МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Журнал заснований у 1918 році

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ

ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 3 2025

Частина 1

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;
Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;
Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технології та дизайну;
Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загально-інженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;
Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 11 від 27 червня 2025 року)

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
зареєстровано відповідно до Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04000.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
(просп. Берестейський, 10, м. Київ, 01135, e-mail: crimea.tnu@gmail.com, тел.: +38 (044) 529-05-16).

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,
французька, словацька, румунська, італійська.

Періодичність: 6 разів на рік.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології; F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка; D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт; J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт
відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International
(Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)
ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2025

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО

Поліщук М.М., Ткач М.М., Луцак Д.С.
МОБІЛЬНИЙ КРОКУЮЧИЙ РОБОТ ІЗ СИСТЕМОЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ РУХУ..... 1

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Лавінський Д.В., Аніщенко Г.О., Конкін В.М., Конохов В.І.
РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ СКЛАДЕНИХ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ОБРОБКИ НАГРІТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ..... 10

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

Холденко В.І.
МЕТОДИ ОЦІНКИ СТАНУ СУДНОВИХ НАСОСІВ НА ОСНОВІ ВІБРАЦІЙНОЇ ТА АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ..... 16

ПРИЛАДИ

Барановський Д.М., Кучеренко В.Л.
ВИКОРИСТАННЯ ПРИКЛАДНИХ І ГРАДІЄНТНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ БЛОКУ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ СІМЕЙНОГО ЛІКАРЯ..... 22

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Бараннік В.В.
МЕТОДОЛОГІЧНА БАЗА ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ НЕРІВНОВАЖНОГО ПОЗИЦІЙНОГО КОДУВАННЯ ВІДЕОДАНИХ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ..... 29

Бобронніков А.С., Лебедев Д.Ю.
МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМФОРТУ В ЖИТЛОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА СИСТЕМА ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ..... 34

Vetoshko I.P., Kravchuk S.O.
INTEGRATION OF MACHINE LEARNING-BASED PREDICTION AND DYNAMIC QOS OPTIMIZATION INTO ADAPTIVE VONR SCHEDULING IN 5G STANDALONE NETWORKS: A SIMULATION-BASED APPROACH..... 42

Гаркавенко О.А., Губар В.Г.
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПОРТАТИВНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ..... 56

Дира В.В.
МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ ETHERNET І WI-FI У ГІБРИДНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ІНФРАСТРУКТУРАХ..... 62

Компанієць В.О., Пустовойтов П.Є.
МОДЕЛЬ МАСШТАБУВАННЯ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА УМОВ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ..... 71

Овдієнко П.К., Лебедев Д.Ю.
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ СКРИНІНГУ СЛУХУ В ПОВСЯКДЕННОМУ ЖИТТІ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ ЗАСОБАМИ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ..... 80

Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Петренко В.І., Скощук В.К.
ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ ОПОРОМ..... 85

Тачиніна О.М., Слободян О.П., Єнчев С.В., Тачинін Є.В.
ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ НИЗЬКОЛІТАЮЧИХ ЦІЛЕЙ ОГЛЯДОВОЮ РАДІОЛОКАЦІЙНОЮ СТАНЦІЄЮ..... 95

Тимофеєв Є.М., Лисенко О.І.
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MIMO ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....106
Chukov O.O., Redko I.V.
CONTINUOUS DEPLOYMENT OF OTA UPDATES IN IOT SOLUTIONS.....115
Юсипів Т.В., Кисельов В.Б., Гуйда О.Г., Омецинская Н.В., Курилко О.Б.
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....125

ЕНЕРГЕТИКА

Воінов О.П., Елькін Ю.Г.
ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ КОТЕЛЬНО-ТОПКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....130
Гарист А.В.
НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА МОДУЛІВ.....140
Дубовкіна І.О., Мирончук А.О.
ЗАСТОСУВАННЯ ЗНАКОЗМІННИХ ІМПУЛЬСІВ ТИСКУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГІДРОПОННОГО ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН.....146
Жуков Р.О., Петрик О.А.
СОНЯЧНІ ТРЕКЕРИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....152
Новосад Ю.І., Воробйов М.В.
АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ГАЗИФІКАЦІЇ БІОМАСИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ.....160
Пешко В.А., Сепік А.В.
ГРАНИЧНІ УМОВИ ТЕПЛООБМІНУ В ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ РОТОРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-200-130.....169
Черноусенко О.Ю., Риндюк Д.В., Затірка О.І.
РЕСУРСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОПРОВОДІВ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ.....177
Шелешей Т.В., Гончаренко М.О.
ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ: ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ.....187
Шпилюр П.С., Іваненко Н.П.
КЛАСИФІКАЦІЯ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ.....193

МЕТАЛУРГІЯ

Єфімова В.Г., Смірнов Ю.О.
ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАКЦІЙНОЇ КАМЕРИ.....199
Єфімова В.Г., Смірнов Ю.О.
ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ПРОДУВАННЯ МЕТАЛУ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ.....205

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Глуховський В.В.
ЗАЛЕЖНІСТЬ ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ АРМУЮЧОГО КОМПОНЕНТУ ВІД ПАРАМЕТРІВ ПОРИСТОСТІ КОМПОЗИТУ.....211
Золотарьова О.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ОЧИЩЕННЯ ЕКСТРАКЦІЙНОЇ ОРТОФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ В ВИРОБНИЦТВІ ЗНЕФТОРЕНОГО АМОНІЙ ФОСФАТУ.....219
Кривда Р.В., Гаценко К.В., Бєлянська О.Р., Кравченко О.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ СТВОРЕННЯ БРИКЕТІВ ПРИ ДОДАВАННІ У ЯКОСТІ В'ЯЖУЧОЇ РЕЧОВИНИ КИСЛОЇ СМОЛКИ ТА ФУСІВ.....225

Малиновський В.В., Мітіна Н.Б.
ВПЛИВ БІОПРЕПАРАТІВ НА ЯКІСТЬ КОМПОСТУ ПРИ ТЕХНОЛОГІЇ АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ.....230
Мельник Л.І., Береговий Т.О.
СТРУКТУРНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИТІВ ІЗ ЗОЛОЮ ВИНОСУ ТЕС.....238
Мітіна Н.Б., Мініна Ю.О.
БІОДЕСТРУКЦІЯ ПОЛІМЕР-ПОЛІМЕРНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ПОЛІСАХАРИДІВ БАКТЕРІЯМИ PSEUDOMONAS.....245
Petrov S.V., Bondarenko S.G., Sanginova O.V., Kolesnyk V.V., Orlyk V.M., Ganczarski M., Rój E.
WATER VAPOR PLASMA GASIFICATION OF PLASTIC.....252
Скиба Ю.М., Скиба М.І., Коваленко І.Л.
СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСТРАКТІВ, ОТРИМАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ ГЛИБОКИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ.....265
Столяренко Г.С.
СИНТЕЗ ТА ВИКОРИСТАННЯ КИСНЕВМІСНИХ РАДИКАЛІВ ПІД ВПЛИВОМ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФІОЛЕТУ У ВИРОБНИЦТВІ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ.....273
Трофімов І.Л., Матвєєва О.Л., Чумак В.Л., Єфименко В.В., Левченко С.В.
РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВОДНЕВО-КИСНЕВО-ОЗОНОВОЇ ТЕРАПІЇ.....281
Шаповал В.М., Пилипенко О.І., Зайцева І.С., Панайотова Т.Д., Смирнов О.О.
СПЕКТОРФОТОМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОКІЛЬКОСТЕЙ ІОНІВ НІКЕЛЮ У СУЛЬФАТНИХ РОЗЧИНАХ.....290

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Дмитренко Н.В., Дабіжа Н.О., Гусарова О.В., Малащук Н.С., Гусаров В.М.
ТЕПЛОМАСООБМІН В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ДИНІ ДО НИЗЬКОГО ЗАЛИШКОВОГО ВОЛОГОВМІСТУ.....296
Сірко З.С., Ващенко В.В., Овчаренко А.О., Костенко О.І., Грицун В.М.
ВПЛИВ ФЕРМЕНТНОГО ПРЕПАРАТУ LAMINEX-750 НА ДЕСТРУКЦІЮ НЕЦУКРІВ БУРЯКОВОГО СОКУ.....306
Скуйбіда Є.Л.
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ.....312

ТРАНСПОРТ

Ботяков А.В.
БЕЗПІЛОТНІ АВІАЦІЙНІ СИСТЕМИ У ГУМАНІТАРНІЙ ЛОГІСТИЦІ: ТРАНСПОРТУВАННЯ ВАКЦИН З ДОТРИМАННЯМ ХОЛОДОВОГО ЛАНЦЮГА.....321
Гілевич В.В., Півторак Г.В., Суслов В.В.
ОЦІНКА ВАЖЛИВОСТІ ПАРАМЕТРІВ ВИБОРУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ПРИ ПЕРЕМІЩЕННІ МІСЬКОЮ ТЕРИТОРІЄЮ.....330
Гнідой Р.І.
ПРИКЛАДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ОБСЯГУ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВНУТРІШНІМ ВОДНИМ ТРАНСПОРТОМ.....336
Ловська А.О., Мурад'ян А.О., Демидюков О.В.
ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ КОНТЕЙНЕРА ТИПУ ХОПЕР ПРИ ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ.....346
Ловська А.О., Павлюченков М.В., Гарбуз А.О., Опанасенко О.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ДОВГОМІРНИХ ВАНТАЖІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМА.....352
Малахов О.В., Ніколаєва Л.Л., Кіріс О.В., Бондаренко А.В., Козирєв І.П., Палагін О.М., Найдьонов А.І.
ВИКОРИСТАННЯ НА СУДНАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СЕПЕРАЦІЇ СУДНОВИХ ЛЛЯЛЬНИХ ВОД.....359

Никитюк П.В., Мельник О.М.
АДАПТИВНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ БАР'ЄРІВ БЕЗПЕКИ СУДНА ТА АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РИЗИКУ 365
Столянов В.А.
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РЕГІОНУ ОБСЛУГОВУВАННЯ РЕЖИМНИХ ВАНТАЖІВ В УНІВЕРСАЛЬНИХ КОНТЕЙНЕРАХ ІЗ ТЕРМОВКЛАДИШАМИ І КРІОГАЗИФІКАТОРАМИ ... 374
Тараненко С.В., Кириченко О.С., Чередник В.М., Колесник В.В., Пріступа С.В., Пастух О.В.
АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ІЗОЛЯТОРІВ І СТРУМОПРОВІДНИХ ШИН СУДНОВОГО ГРЩ В РЕЖИМІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ 383
Тараненко С.В., Кириченко О.С., Чередник В.М., Колесник В.В., Пріступа С.В., Мельник В.Ю.
ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ГЕНЕРАТОРА ВІБРАЦІЙ З ОДНИМ СТУПЕНЕМ ВІЛЬНОСТІ 391
Fomin O.V., Lohvinenko O.A., Kuzmenko S.V., Zaverkin A.V.
CLASSIFICATION OF POSITIVE-ACTION COMPRESSORS FOR RAILWAY ROLLING STOCK ... 399
Черненко П.В., Фисун В.В., Просвєт Ю.Д.
АВТОМОБІЛІ MAN TGS НА ШАСІ 4×4 ТА 6×6 В СУЧАСНІЙ ВІЙНІ, ЇХ ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ 407
Чижик В.М., Швець М.Д., Іваненко Р.О.
ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ЛОГІСТИКИ ГУМАНІТАРНОЇ ДОПОМОГИ ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ 413
Шапенко Є.М., Котова С.О., Ярошевський В.В.
ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА 422
Шпак Н.Г., Літачевський В.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИ ВИКОНАННІ МІЖНАРОДНИХ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ 428

ЕЛЕКТРОНІКА

Антропов А.О., Губар В.Г.
ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ КОНТРОЛЕРУ КЕРУВАННЯ ПОВОРОТОМ АНТЕНИ 434
Ромашко В.Я., Батрак Л.М.
ВПЛИВ ВИХІДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛА НА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ... 441

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ 448

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Polishchuk M.M., Tkach M.M., Lutsak D.S.
MOBILE WALKING ROBOT WITH MOTION ENERGY RECOVERY SYSTEM 1

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Lavinsky D.V., Anischenko G.O., Konkin V.M., Konokhov V.I.
COMPUTATIONAL STRENGTH ANALYSIS OF FOLDED MOLDS FOR PROCESSING HEATED POWDER MATERIALS 10

SHIPBUILDING

Kholdenko V.I.
METHODS FOR ASSESSING THE CONDITION OF SHIP PUMPS BASED ON VIBRATION AND ACOUSTIC DIAGNOSTICS DURING OPERATION 16

EQUIPMENT

Baranovskyi D.M., Kucherenko V.L.
USE OF APPLIED AND GRADIENT OPTIMIZATION METHODS FOR DEVELOPMENT OF A FAILURE PREDICTION BLOCK IN A FAMILY DOCTOR'S DECISION SUPPORT SYSTEM 22

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Barannik V.V.
METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR IMPROVING THE SYSTEM OF NONEQUILIBRIUM POSITIONAL VIDEO DATA ENCODING IN INFOCOMMUNICATION SYSTEMS 29

Bobronnikov A.S., Lebedev D.Yu.
METHODS OF PROVIDING COMFORT IN THE LIVING ENVIRONMENT AND A SYSTEM FOR THEIR IMPLEMENTATION 34

Vetoshko I.P., Kravchuk S.O.
INTEGRATION OF MACHINE LEARNING-BASED PREDICTION AND DYNAMIC QOS OPTIMIZATION INTO ADAPTIVE VONR SCHEDULING IN 5G STANDALONE NETWORKS: A SIMULATION-BASED APPROACH 42

Harkavenko O.A., Hubar V.H
RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF A PORTABLE DEVICE FOR MEASURING ROAD SURFACE CHARACTERISTICS 56

Dyra V.V.
METHODS OF OPTIMIZING ETHERNET AND WI-FI INTERACTION IN HYBRID TELECOMMUNICATION INFRASTRUCTURES 62

Kompaniiets V.O., Pustovoitov P.E.
NETWORK SCALPING MODEL BASED ON STOCHASTIC PROCESSES UNDER SELF-SIMPLE TRAFFIC CONDITIONS 71

Ovdiienko P.K., Lebedev D.Yu.
RESEARCH OF HEARING SCREENING PROBLEMS IN EVERYDAY LIFE AND WAYS TO SOLVE THEM USING MOBILE TECHNOLOGIES 80

Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Petrenko V.I., Skoshchuk V.K.
RESEARCH OF A DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE 85

Tachynina O.M., Slobodian O.P., Yenchev S.V., Tachynin Ye.V.
DETERMINING THE DETECTION RANGE OF LOW-FLYING TARGETS BY A SURVEILLANCE RADAR STATION 95

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I.
AN ANALYTICAL REVIEW OF APPROACHES TO THE APPLICATION OF MIMO TECHNOLOGY FOR MONITORING CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES.....106

Chukov O.O., Redko I.V.
CONTINUOUS DEPLOYMENT OF OTA UPDATES IN IOT SOLUTIONS.....115

Yusypiv T.V., Kyselov V.B., Guida O.G., Ometsinska N.V., Kurylko O.B.
MATHEMATICAL MODELING OF SPEECH RECOGNITION SYSTEMS BASED ON FUZZY LOGIC.....125

POWER ENGINEERING

Voinov O.P., Elkin Yu.H.
PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF BOILER-FURNACE TECHNOLOGIES.....130

Haryst A.V.
NEW TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING SOLAR PANELS AND MODULES.....140

Dubovkina I.O., Myronchuk A.O.
APPLICATION OF ALTERNATING IMPULSES OF PRESSURE FOR INTENSIFICATION OF HYDROPONIC.....146

Zhukov R.O., Petryk O.A.
SOLAR TRACKERS IN SPACE-CONSTRAINED CONDITIONS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF SOLAR POWER PLANTS.....152

Novosad Yu.I., Vorobiov M.V.
ANALYSIS OF BIOMASS GASIFICATION PROCESSES AND FORECASTING THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF SYNGAS.....160

Peshko V.A., Sepik A.V.
BOUNDARY CONDITIONS OF HEAT EXCHANGE IN THE FLOW SECTION OF THE INTERMEDIATE PRESSURE ROTOR OF K-200-130 TURBINE.....169

Chernousenko O.Yu., Rindyuk D.V., Zatyrka O.I.
RESOURCE CHARACTERISTICS OF HEATING NETWORK PIPELINES.....177

Sheleshei T.V., Honcharenko M.O.
IMPACT OF ENERGY SYSTEMS ON ECOSYSTEM SERVICES: CHALLENGES AND STRATEGIC DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT.....187

Shpyliur P.S., Ivanenko N.P.
CLASSIFICATION OF FACTORS THAT AFFECT THE INCREASE IN EFFICIENCY AND EXTENSION OF THE SERVICE LIFE OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS.....193

METALLURGY

Yefimova V.G., Smirnov Yu.O.
REFINING OF STEEL IN THE TUNDISH WITH A REACTION CHAMBER.....199

Yefimova V.G., Smirnov Yu.O.
DETERMINATION OF OPTIMAL MODES FOR PURGE OF METAL WITH INERT GAS DURING CONTINUOUS CASTING.....205

CHEMICAL TECHNOLOGY

Glukhovskyi V.V.
DEPENDENCE OF THE INTENSITY OF CORROSION PROCESSES OF THE REINFORCING COMPONENT ON THE POROSITY PARAMETERS OF THE COMPOSITE.....211

Zolotarova O.V.
RESEARCH ON PURIFICATION METHODS OF EXTRACTION-GRADE ORTHOPHOSPHORIC ACID IN THE PRODUCTION OF DEFLUORINATED AMMONIUM PHOSPHATE.....219

Kryvda R.V., Hatsenko K.V., Byelyanska O.R., Kravchenko O.V.
RESEARCH ON BRIQUETTE FORMATION USING ACID TAR AND FUS AS BINDERS.....225

Malynovskyi V.V., Mitina N.B
INFLUENCE OF BIOLOGICAL PRODUCTS ON THE QUALITY OF COMPOSTS
WHEN USING THE TECHNOLOGY OF AEROBIC COMPOSTING.....230

Melnyk L.I., Berehovyj T.O.
STRUCTURAL FACTORS INFLUENCING THE THERMAL CONDUCTIVITY
OF COMPOSITES FILLED WITH FLY ASH FROM THERMAL POWER PLANTS.....238

Mitina N.B., Minina Yu.O.
BIODEGRADATION OF POLYMER-POLYMER BLENDS BASED ON POLYSACCHARIDES
BY PSEUDOMONAS BACTERIA.....245

Petrov S.V., Bondarenko S.G., Sanginova O.V., Kolesnyk V.V., Orlyk V.M., Ganczarski M., Rój E.
WATER VAPOR PLASMA GASIFICATION OF PLASTIC.....252

Skyba Yu.M., Skyba M.I., Kovalenko I.L.
SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES USING EXTRACTS OBTAINED IN DEEP
EUTETIC SOLVENT ENVIRONMENTS.....265

Stolyarenko H.S.
SYNTHESIS AND USE OF OXYGEN RADICALS UNDER THE INFLUENCE OF VACUUM
ULTRAVIOLET IN THE PRODUCTION OF NITRIC ACID.....273

Trofimov I.L., Matveyeva O.L., Chumak V.L., Efimenko V.V., Levchenko S.V.
DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR HYDROGEN-OXYGEN-OZONE THERAPY.....281

Shapoval V.M., Pylypenko O.I., Zayceva I.S., Panayotova T.D., Smirnov O.O.
SPECTROPHOTOMETRIC DETERMINATION OF MICROQUANTITY OF NICKEL IONS
IN SULPHATE SOLUTIONS.....290

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Dmytrenko N.V., Dabizha N.O., Husarova O.V., Malashchuk N.S., Husarov V.M.
HEAT AND MASS TRANSFER OF MELON DRYING TO A LOW RE-SIDUAL
MOISTURE CONTENT.....296

Sirko Z.S., Vashchenko V.V., Ovcharenko O.A., Kostenko O.I., Gritsun V.M.
INFLUENCE OF ENZYME PREPARATIONS ON THE DESTRUCTION OF NON-SUGARS
IN BEET JUICE.....306

Skuibida Ye.L.
IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF FOOD PRODUCTION EQUIPMENT
BY OPTIMIZING TRANSIENT PROCESSES.....312

TRANSPORT

Botiakov A.V.
HUMANITARIAN LIGISTICS & UNMANNED AVIATION SYSTEMS IN THE CONTEXT
OF COLD CHAIN VACCINES TRANSPORTATION.....321

Hilevych V.V., Pivtorak H.V., Suslov V.V.
ASSESSMENT OF THE IMPORTANCE OF PA RAMETERS FOR PUBLIC TRANSPORT
CHOICE IN URBAN TRAVEL 330

Hnidoi R.I.
APPLIED RESEARCH TO JUSTIFY THE PROSPECTIVE VOLUME OF INLAND
WATERWAY TRANSPORT.....336

Lovska A.O., Muradian A.O., Demydiakov O.V.
DETERMINATION OF THE STRENGTH OF A HOPPER CONTAINER DURING LOADING
AND UNLOADING OPERATIONS.....346

Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Garbuz A.O., Opanasenko O.V.
RESEARCH OF THE LOADING OF A FLAT WAGON FOR LONG CARGO
IN OPERATIONAL MODES....352

Malakhov O.V., Nikolaieva L.L., Kiris O.V., Bondarenko A.V., Kozyryev I.P., Palagin O.M., Naydyonov A.I.
USE OF BIELDGE WATER ULTRASONIC SEPARATION ON VESSELS....359

Nykytyuk P.V., Melnyk O.M.
ADAPTIVE ASSESSMENT OF SHIP SAFETY BARRIER DEGRADATION
AND OPERATIONAL RISK ANALYSIS....365

Stolianov V.A.
METHOD OF DETERMINING THE SERVICE REGION REGIME CARGOES IN UNIVERSAL
CONTAINERS WITH THERMAL LINERS AND CRYOGASIFIERS....374

Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Cherednyk V.M., Kolesnyk V.V., Pristupa S.V., Pastukh O.V.
ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC STABILITY OF INSULATORS AND BUSBARS
OF THE MAIN SWITCHBOARD OF A SHIP UNDER SHORT-CIRCUIT CONDITIONS....383

Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Cherednyk V.M., Kolesnyk V.V., Pristupa S.V., Melnik V.Yu.
IDENTIFICATION OF A SINGLE-DEGREE-OF-FREEDOM VIBRATION GENERATOR MODEL....391

Fomin O.V., Lohvinenko O.A., Kuzmenko S.V., Zaverkin A.V.
CLASSIFICATION OF POSITIVE-ACTION COMPRESSORS FOR RAILWAY ROLLING STOCK....399

Chernenko P.V., Fysun V.V., Prosviet Yu.D.
MAN TGS CARS ON CHASSIS 4×4 AND 6×6 IN MODERN WAR, THEIR MAINTENANCE
AND REPAIR....407

Chyzhyk V.M., Shvets M.D., Ivanenko R.O.
USE OF UNMANNED TECHNOLOGIES IN HUMANITARIAN AID LOGISTICS SYSTEMS
DURING EMERGENCY SITUATIONS....413

Shapenko Ye.M., Kotova S.O., Yaroshevskyi V.V.
THEORETICAL FOUNDATIONS OF FORMATION AND EVALUATION OF THE LOGISTICS
POTENTIAL OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE....422

Shpak N.G., Litachevskyi V.V.
RESEARCH OF TRANSPORT CHAINS IN INTERNATIONAL MARITIME CARGO
TRANSPORTATION....428

ELECTRONICS

Antropov A.O., Gubar V.G.
RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF CREATING AN ANTENNA
ROTATION CONTROLLER....434

Romashko V.Ya., Batrak L.M.
THE INFLUENCE OF THE SOURCE'S OUTPUT CHARACTERISTICS ON ITS ENERGY
PERFORMANCE....441

INFORMATION ABOUT AUTHORS....448

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.865.8(031)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/01

Поліщук М.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткач М.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Луцак Д.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОБІЛЬНИЙ КРОКУЮЧИЙ РОБОТ ІЗ СИСТЕМОЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ РУХУ

Стаття присвячена вирішенню проблеми обмеженого енергетичного ресурсу автономних джерел живлення мобільних роботів. Відомо, що крокуюча трансмісія мобільних роботів, на відміну від колісної, має значно більшу кількість приводів, тому завдання економії енергетичного ресурсу набуває особливу актуальність. Визначено, що перспективним напрямком вирішення означеного завдання є застосування принципу рекуперації енергії. В статті запропоновано принципово нову конструкцію крокуючої трансмісії, яка дозволяє накопичувати потенціальну енергію і надалі перетворювати її в кінетичну енергію руху мобільного робота. Кожен попередній крок робота є етапом накопичення потенціальної енергії, коли електродвигуни увімкнуті, а кожен наступний крок, коли двигуни вимкнуті, є етапом перетворення накопиченої енергії в кінетичну енергію руху. З'ясовано, що у якості енергоносія слід використовувати стисле повітря у пневматичних циліндрах, поршні котрих через не самогальмуючу гвинтову передачу та зубчаті шестерні кінематично зв'язані з електродвигунами. Вказані відмінні ознаки складають аспект технічної новизни, а наукова новизна ґрунтується на побудованій динамічній моделі руху крокуючого робота, на основі якої отримані аналітичні залежності для розрахунку параметрів робота з модулями рекуперації енергії. Також в статті визначені умови стабільного руху мобільного робота, тобто умови відсутності проковзування ніг по опорній поверхні з урахуванням сил та швидкостей переміщення, що вкрай важливо для забезпечення надійності функціонування крокуючих роботів. Запропоновані графоаналітичні залежності руху робота, трансмісія якого надає можливість накопичення та перетворення енергії. Доведено, що застосування принципу рекуперації енергії надає суттєву економією ресурсів автономних джерел живлення, притаманних мобільним роботам. Таким чином, підвищується енергетична ефективність мобільних роботів під час виконання транспортних і технологічних операцій різного призначення.

Ключові слова: *мобільні роботи, крокуючі механізми, антропоморфні конструкції, педіпулятори, акумулятори енергії, рекуперації енергії.*

Постановка проблеми. Не дивлячись на різноманітність сучасних моделей крокуючих роботів, в тому числі і антропоморфних, досі відсутні технічні рішення, спрямовані на економію енергетичних ресурсів автономних джерел живлення. Перспективним напрямком вирішення означеного завдання є використання модулів рекуперації енергії, інтегрованих в трансмісію крокуючих механізмів, тобто педіпуляторів мобільного робота. Але створення нових конструктивних рішень подібних роботів не достатньо, а потрібна побудова динамічної моделі руху, яка б дозволила здійснювати імітацію переміщення робота з розрахунками основних енергетичних характеристик та умов стійкості крокуючого мобільного робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявність експериментальних зразків мобільних роботів [1], в яких застосовані різноманітні засоби зчеплення з поверхнею переміщення, не усуває проблему енергоефективності підсистем роботів, що компенсують або долають гравітаційне навантаження для гарантованого втримання робота на довільно орієнтованій поверхні переміщення. Мобільний робот [2] з важільною трансмісією, на шарнірах котрої встановлено електроприводи, а у якості системи зчеплення застосовані вакуумні захвати, дозволяє здійснювати ефективний перехід з горизонтальної на вертикальну поверхню переміщення. Однак трансмісії цього робота притаманна велика кількість двигунів, що не сприяє енергозбереженню його приводів. Принципово інша система утримання робота на поверхні переміщення, а саме у якості генератора вакууму, запропонована в конструкції робота CCNY Robotics Lab City University New York, що відображена в дослідженнях [3]. Автономним генератором вакууму створюється зона пониженого тиску між корпусом робота і поверхнею переміщення, за рахунок чого робот і утримується на вказані поверхні, а трансмісія у вигляді колісної бази дозволяє роботу досягати досить високої швидкості руху. Але наведені вище приклади роботів не передбачають вирішення задачі енергетичної ефективності їх приводів.

Суттєвою відзнакою мобільного робота Boston Dynamics є наявність пласко паралельних педіпуляторів, оснащених голчастими механічними захватами [4]. Ці властивості надають можливість переміщення робота як у прямокутній Декартові системі координат, що необхідно для обслуговування висотних будинків, так і циліндричній системі координат, притаманній таким об'єктам, як дерева, чи стовпи ліній електропередач або трубопроводи. Відаючи належне оригінальності конструкцій наведених моделей, слід зауважити, що роботи з механічним зчепленням [5] відрізняються підвищеною надійністю, але їх приводи вимагають застосування редукції, що збільшує вагу робота, а значить і його гравітаційне навантаження, для компенсації якого доцільне використання систем нагромадження й перетворення енергії руху [6].

Моделювання енергетичної ефективності мобільних роботів викладене в роботі [7], де представлений новий підхід до побудови енергетично ефективних планів руху. Розроблена модель передбачає обчислення енергетичних витрат при різних маршрутах, швидкостях, прискореннях і гальмуваннях на поворотах. Під енергоспоживанням робота розуміється підлягаюча мінімізації сума потужностей усіх двигунів мобільного робота. Даний підхід відрізняється простотою й оригінальністю критерію, що дозволяє мінімізувати енергетичні витрати при покритті максимально можливої площі обслуговування роботом з колісною трансмісією. Однак у даній роботі не запропоновані рекомендації щодо забезпечення енергетичної ефективності власне конструкцій мобільних роботів.

Моделювання енергетичної ефективності мобільних роботів викладене в роботі [7], де представлений новий підхід до побудови енергетично ефективних планів руху. Розроблена модель передбачає обчислення енергетичних витрат при різних маршрутах, швидкостях, прискореннях і гальмуваннях на поворотах. Під енергоспоживанням робота розуміється підлягаюча мінімізації сума потужностей усіх двигунів мобільного робота. Даний підхід відрізняється простотою й оригінальністю критерію, що дозволяє мінімізувати енергетичні витрати при покритті максимально можливої площі обслуговування роботом з колісною трансмісією. Однак у даній роботі не запропоновані рекомендації із забезпечення енергетичної ефективності власне конструкцій мобільних роботів. Незважаючи на оригінальність антропоморфних конструкцій мобільних роботів [8, 9], у них відсутні засоби рекуперації енергії руху.

Підсистеми зчеплення з поверхнею руху поряд з підсистемами приводів, також визначають енергетичну ефективність мобільних роботів. Тому становить інтерес інший методологічний підхід до моделювання умов зчеплення мобільного робота з поверхнею довільної орієнтації, запропонований у роботі [10]. Метод заснований на теорії опору матеріалів, а саме: для забезпечення гарантованого зчеплення робота з поверхнею переміщення обчислюється значення нормальної напруги в зоні контакту й порівнюється із граничним значенням напруги при розтяганні й стиску поверхні контакту. Дана модель дозволяє контролювати міцність зчеплення ніг робота з поверхнею переміщення, однак у ній не відображені розв'язки, спрямовані саме на підвищення енергетичної ефективності приводів зчеплення робота з поверхнею переміщення.

Дослідження [11] становлять інтерес з погляду оптимального управління антропоморфними

конструкціями. У статті [12] запропоновані крокуючі механізми мініатюрного робота на основі біологічних систем із двома принципами пересування за допомогою ніг. Показано, що з допомогою сучасної програмної інженерії біоніка може бути ефективним інструментом. Однак у зазначених дослідженнях відсутні пристрої рекуперації енергії. У роботі [13] запропонований критерій енергетичної ефективності у вигляді показника питомої потужності мобільного робота. Даний критерій є домінуючим показником енергетичної підсистеми мобільного робота. На відміну від попередніх досліджень, у роботі [14] виконано аналіз стаціонарних промислових роботів із акумуляторами потенціальної енергії. Наведено різні технічні рішення промислових роботів із пристроями рекуперації енергії. Однак у зазначеній роботі відсутні пропозиції рекуперації енергії для мобільних роботів, динаміка цих роботів істотно відрізняється від автоматичних стаціонарних маніпуляторів. У жодній з розглянутих технічних реалізацій роботів не запропоновані способи чи конструкції для підвищення їх енергетичної ефективності, що для мобільних роботів має принципове значення. Таким чином, аналіз наведених вище досліджень показує, що проблема підвищення енергетичної ефективності крокуючих мобільних роботів залишається актуальною.

Постановка завдання. Необхідно створити мобільний робот, приводи та трансмісія якого мають здатність нагромадження потенціальної енергії на кожному попередньому кроці й перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці переміщення робота, але вже при вимкнутих двигунах приводів. Також необхідно побудувати динамічну модель мобільного робота з модулем рекуперації енергії для дослідження параметрів його руху. Вирішення вказаних задач забезпечить економію енергетичного ресурсу автономного джерела живлення, а значить і підвищення енергетичної ефективності мобільних роботів.

Виклад основного матеріалу. *Конструкція крокуючого робота*. Основною мотивацією цього дослідження є створення модуля рекуперації енергії для приводів ніг крокуючого робота. Наслідком цієї якості є значна економія енергетичних ресурсів автономних джерел живлення робота.

Педіпулятори робота (тобто його ноги) виконані у вигляді шарнірних паралелограмів [15], на кінцівках котрих встановлені захвати зчеплення з поверхнею переміщення (рис. 1). Для приводу педіпуляторів використовуються пневматичні циліндри, розміри яких залежать від вантажопідйомності та ваги самого робота. В даному випадку по діагоналі корпусу робота встановлені пристрої повороту для зміни маршруту руху і модулі рекуперації енергії у вигляді пневматичних циліндрів. Головна технічна відзнака полягає у наявності пневматичних (газових) циліндрів, поршні котрих через не самогальмуючу

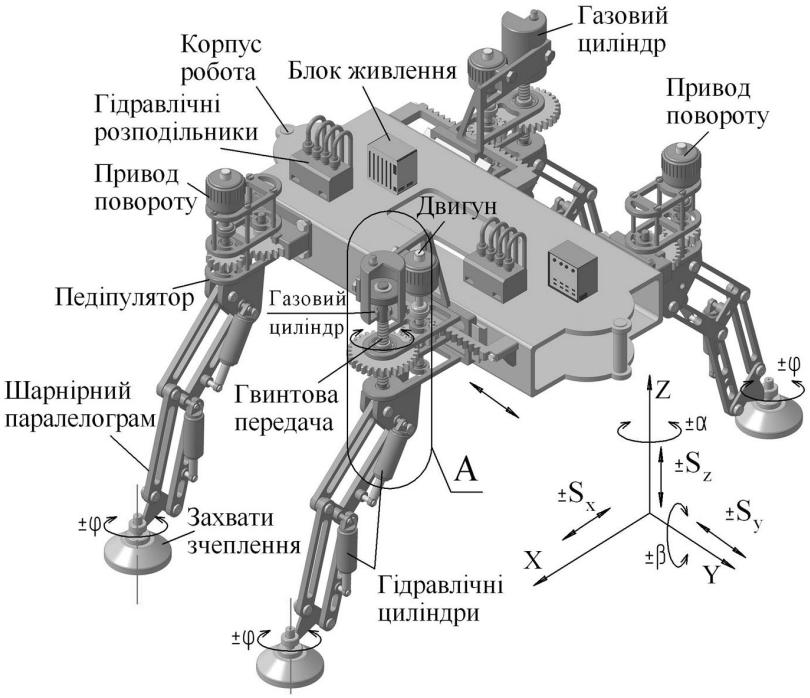


Рис. 1. Конструкція крокуючого робота з модулями рекуперації енергії

гвинтову передачу та зубчаті шестерні кінематично зв'язані з двигуном. Саме означені пневматичні циліндри виконують функцію накопичення потенціальної енергії на першому кроці та перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному другому кроці робота.

Захвати зчеплення діагонально розташованих педіпуляторів вмикаються та вимикаються почергово, здійснюючи покроковий рух робота. В системі координат XYZ робот має п'ять ступенів свободи, а саме: повздовжнє переміщення $\pm S_Y$ та нахил $\pm\beta$ відносно осі Y; переміщення $\pm S_Z$ та поворот $\pm\alpha$ відносно осі Z; переміщення $\pm S_X$ по осі X. Така кількість ступенів рухомості дозволяє роботові виконувати не тільки транспортні, а й технологічні операції.

Конструкція пневматичного накопичувача енергії цього робота показана виносним елементом «А» (рис. 1) на рис. 2. На першому кроці переміщення по команді контролера включається електричний двигун, який через муфту і вал передає обертання приводній шестірні, що обертає зубчасте колесо і не самогальмуючу гайку. Остання повідомляє поступальне переміщення гвинту і встановленому на ньому з можливістю вільного обертання поршню. При цьому поршень стискає повітря, що перебуває в порожнині «с».

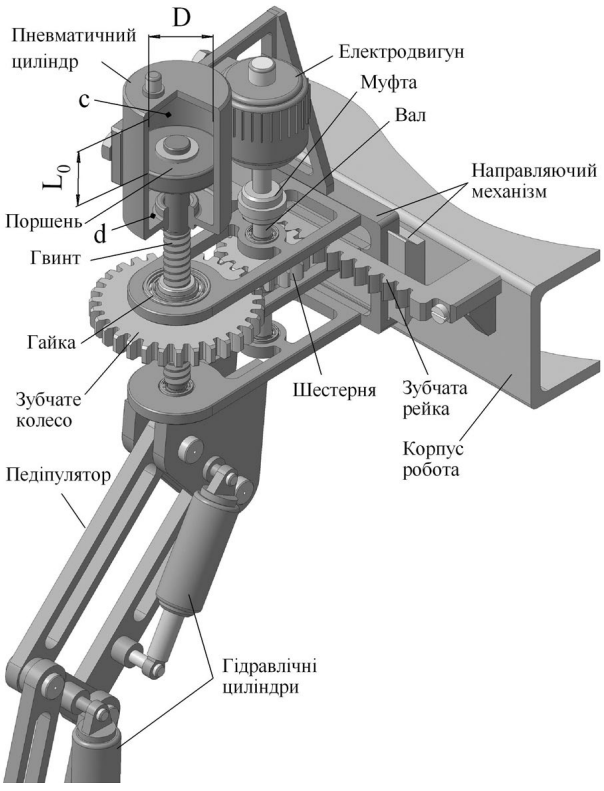


Рис. 2. Конструкція модуля рекуперації енергії (див. елемент «А» на рис. 1)

Одночасно шестірня повідомляє поступальне переміщення зубчастій рейці, жорстко закріпленої на корпусі робота. Оскільки захвати однієї пари педіпуляторів зчеплені з поверхнею переміщення, то робот рухається з напрямними поступально разом із педіпуляторами, захвати яких вільні від зчеплення з поверхнею переміщення. На цьому етапі – першому кроці, за рахунок того, що поршень стискає повітря в порожнині «с» нагромаджується певний запас потенціальної енергії для подальшого її перетворення в кінетичну енергію руху.

Процес руху корпуса робота і одночасного стиску газу в порожнині «с» буде тривати доти, поки тиск газу не досягне заданого проектом значення. Після чого спрацьовує датчик тиску, по сигналу якого контролер виключає двигун, муфту і відключає зчеплення захватів однієї пари педіпуляторів і одночасно включає зчеплення таких же захватів двох інших педіпуляторів. Далі сила стислого газу діє на поршень, і тим самим переміщає гвинт не самогальмуючої гвинтової передачі у зворотному напрямку, обертаючи через гайку тепер уже зубчате колесо також у зворотному напрямку. Інакше кажучи, поступальний рух не самогальмуючого гвинта під дією сили стислого раніше газу в порожнині «с» перетворюється в обертовий рух колеса і шестірні у зворотному напрямку. А оскільки одна пара педіпуляторів, на відміну від іншої діагонально розташованої, тепер вільна від зчеплення з поверхнею переміщення, то шестірня, обкатуючись по зубчастій планці, переміщає у направляючому механізмі відповідні педіпулятори, які вільні від зчеплення з поверхнею руху робота.

Переміщення педіпуляторів буде відбуватися до падіння тиску в порожнині «с», рівного початковому значенню. При цьому їх швидкість не буде постійної, на відміну від першого кроку переміщення педіпуляторів, у зв'язку із зазначеним падінням тиску в газовому циліндрі. Однак цей недолік не настільки суттєвий у порівнянні з економією енергії, яка досягається при переміщенні педіпуляторів на наступний крок, але вже при вимкнутих двигунах. При необхідності руху робота у зворотному напрямку, тобто заднім ходом, контролером перемикається пневматичний розподільник (рис. 3) і порожнина «с» з'єднується з атмосферою, а порожнина «d», навпаки, заглушається для стиску газу й нагромадження потенціальної енергії. Схема пневматичного розподільника на рис. 3 показана для двох циклів, а саме для руху вперед и руху назад.

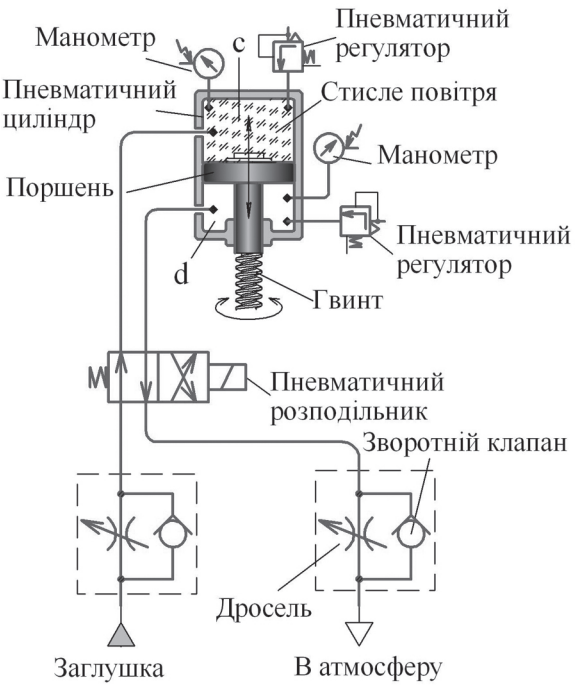


Рис. 3. Пневматична схема керування модулем рекуперації енергії

Принципова схема управління включає цифрові манометри для контролю тиску стисненого повітря та регулятори його тиску. Пневматичні дроселі призначені для регулювання швидкості потоку стиснутого повітря. Двигун на першому кроці заднього ходу робота буде працювати в реверсивному напрямку, а на другому кроці буде вимкнутий аналогічно вище описаному руху вперед. Таким чином відбувається накопичення потенціальної енергії на кожному першому кроці робота і перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному другому кроці переміщення робота, але вже при вимкнутих двигунах, що надає суттєву економію ресурсу автономних джерел живлення мобільних роботів.

Динамічна модель робота. Для можливості дослідження крокуючих мобільних роботів з модулями рекуперації енергії нижче наведено динамічні моделі руху робота та модуля рекуперації енергії, а також пропонуються графіки зміни кінематичних характеристик та наводяться вперше створені аналітичні формули для розрахунку кінематичних параметрів. При вмиканні електричних двигунів приводу (див. рис. 1 та рис. 2) корпус робота, а разом з ним і вільні від зчеплення з поверхнею переміщення педіпулятори, почнуть рухатись поступально у напрямку вісі *Ox*. Для опису їх руху використаємо рівняння Лагранжа 2-го роду

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\left(\frac{\partial T}{\partial q_i}\right)=Q_{q_i},\quad i=1...k, \tag{1}$$

де κ – кількість степенів вільності механічної системи; q_i – узагальнені координати; $\dot{q}_i$ – узагальнені швидкості; $T(\dot{q}_i, q_i)$ – кінетична енергія механічної системи, яка є функцією в узагальнених координатах і узагальнених швидкостей; Q_{qi} – узагальнена сила, що відповідає узагальненій координаті q_i. У нашому випадку система має одну степінь вільності. За узагальнену координату виберемо поступальне переміщення корпусу робота $q_1 = x_1$. Відповідно, $\dot{x}_1$ – узагальнена швидкість. Тоді, вираз для кінетичної енергії корпусу і двох вільних від зчеплення педіпуляторів матиме вигляд

$$T_1 == \frac{(m+2m_1)(\dot{x}_1)^2}{2}, \tag{2}$$

де m – маса корпусу робота; $m_1 = 0{,}25m$ – маса одного педіпулятора, а кінетичну енергію T_4 шестерні (рис. 2), яка здійснює обертальний рух, знаходимо за формулою

$$T_4 = \frac{J_4\omega_4^2}{2}, \tag{3}$$

де $J_4 = \frac{m_4 r_4^2}{2}$ – момент інерції шестерні відносно осі обертання; m_4 – маса шестерні; r_4 – радіус шестерні; $\omega_4 = \dot{x}_1 / r_4$ – її кутова швидкість. Кінетичними енергіями гвинта і поршня нехтуємо, оскільки вони незначні. Повна кінетична енергія T механізму дорівнює

$$T = T_1 + T_4 = \frac{(m+2m_1)(\dot{x}_1)^2}{2} + \frac{m_4(\dot{x}_1)^2}{4}. \tag{4}$$

Знайдемо частинні похідні від кінетичної енергії, що входять у рівняння (1)

$$\frac{\partial T}{\dot{x}_1} = (m+2m_1)(\dot{x}_1) + \frac{m_4(\dot{x}_1)}{2},\ \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0. \tag{5}$$

Обчислимо ще повну похідну за часом

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1}\right) = (m+2m_1)(\ddot{x}_1) + \frac{m_4(\ddot{x}_1)}{2}. \tag{6}$$

Узагальнену силу Q_{q_i} знаходимо за загальною формулою

$$Q_{qi} = \frac{\delta A_{q_i}}{\delta_{q_i}}, \tag{7}$$

де δ_{q_i} – можливий приріст узагальненої координати; δA_{q_i} – можлива робота сил, що діють на механічну систему, на відповідному можливому переміщенні.

У нашому випадку надамо можливий приріст δ_{x_1} переміщенню корпусу робота x_1. В результаті,

одержить можливий приріст кута повороту приводної шестерні (рис. 2) $\delta_\varphi = \delta_{x_1} / r_4$, на якому моменти М1 приводів виконують роботу. Виконують можливу роботу також сили тиску газу і сили тертя у гвинтових передачах

$$\delta A_{x_1} = \left(\frac{2M_1}{r_4}\delta_{x_1} - 2\frac{(p_1 - p_a)\pi D^2}{4}(\delta_h + f\delta_s) \right), \quad (8)$$

де D – діаметр поршня; p_a – атмосферний тиск; $p_1 = p_o\left(\frac{L_o}{L_o - ax_1}\right)$; L_o – довжина камери при мінімальному тиску p_o; $a = \frac{ns}{2\pi r_4 k}$; s – крок нарізки гвинта; f – коефіцієнт тертя ковзання у гвинтовій парі; n – кількість заходів гвинта; k – передатне відношення; $\delta_h = a\delta_{x_1}$; $\delta_s = \frac{d}{2r_4 k}\delta_{x_1}$; d – діаметр гвинта.

Отже, враховуючи формули (7), (8) і введені позначення, узагальнена сила буде дорівнювати

$$Q_{x_1} = 2\left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_1 - p_a)\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} + f\frac{d}{2}\right) \right). \quad (9)$$

Підставляємо знайдені вирази похідних та узагальненої сили у вираз (1) і одержуємо диференціальне рівняння руху корпусу робота на першій частині циклу

$$\left(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2}\right)\frac{d^2x_1}{dt^2} =$$

$$= 2\left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_1 - p_a)\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} + f\frac{d}{2}\right) \right). \quad (10)$$

Динамічна модель модуля рекуперації енергії. Нагромаджену потенціальну енергію стисненого газу використаємо тепер для приведення у рух вільного педіпулятора, щоб перемістити його у початкове положення відносно корпусу робота. Для дослідження цього руху також як і раніш використаємо рівняння Лагранжа 2-го роду (1). Аналогічно викладеному вище отримаємо вираз для кінетичної енергії педіпулятора і шестерні (рис. 2) матиме вигляд

$$T_2 == \frac{(m_1 + m_4/2)}{2}(\dot{x}_1)^2 \ . \quad (11)$$

Знайдемо частинні похідні від кінетичної енергії T_2, що входять у рівняння (1)

$$\frac{\partial T}{\dot{x}_2} = (m_1 + m_4/2)(\dot{x}_2), \quad \frac{\partial T_2}{\partial x_2} = 0 . \quad (12)$$

Обчислимо ще повну похідну за часом

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_2}{\partial \dot{x}_2}\right) = (m_1 + m_4/2)(\ddot{x}_2) . \quad (13)$$

Для визначення узагальненої сили Q_{q_i} за формулою (7) надамо можливий приріст δ_{x_2} переміщенню x_2. В результаті, одержить можливий приріст кут повороту шестерні (рис. 2) $\delta_\varphi = \delta_{x_1} / r_4$. Можливу роботу виконують сили тиску газу і сили тертя у гвинтових парах, а тому для узагальненої сили має місце формула

$$Q_{x2} = \left(\frac{(p_2 - p_a)\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} - f\frac{d}{2}\right) \right), \quad (14)$$

де $p_2 = p_o\left(\frac{L_o}{L_o - a(L_3 - x_2)}\right)$; L_3 – переміщення корпусу робота на попередньому циклі. Тоді диференціальне рівняння руху вільного педіпулятора при рекуперації енергії матиме вигляд

$$(m_1 + m_4/2)\frac{d^2x_2}{dt^2} = \left(\frac{(p_2 - p_a)\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} - f\frac{d}{2}\right) \right). \quad (15)$$

Якщо врахувати, що

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} = \frac{d\dot{x}_1}{dt} = \frac{d\dot{x}_1}{dx_1}\frac{dx_1}{dt} = \frac{d(\dot{x}_1)^2}{2dx_1} ,$$

то рівняння (10) легко інтегрувати

$$\left(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2}\right)\frac{1}{2}\int_0^{v_1} d(\dot{x}_1)^2 =$$

$$= 2\int_0^{x_1}\left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p - p_a)\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} + f\frac{d}{2}\right) \right)dx_1 . \quad (16)$$

Звідси знаходимо залежність швидкості корпусу робота від його положення (координати x_1)

$$V_1 = \sqrt{\frac{4}{\left(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2}\right)}\left(\frac{M_1}{r_4}x_1 - \left(\frac{p_o L_o}{a} Ln\frac{L_o}{L_o - ax_1} - p_a x_1 \right)\frac{\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} + f\frac{d}{2}\right) \right)}, \quad (17)$$

Оскільки $V_1 = \frac{dx_1}{dt}$, то вираз (17) можна ще раз інтегрувати і знайти залежність між часом руху і положенням корпусу

$$t_1 = \int_0^{x_1} \frac{dz}{\sqrt{\frac{4}{\left(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2}\right)}\left(\frac{M_1}{r_4}z - \left(\frac{p_o L_o}{a} Ln\frac{L_o}{L_o - az} - p_a z \right)\frac{\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} + f\frac{d}{2}\right) \right)}} . \quad (18)$$

Означений інтеграл у правій частині формули (18) можна обчислювати яким-небудь

числовим методом, наприклад, методом трапецій. Аналогічно, можна розв'язати диференціальне рівняння (15). У результаті одержимо вираз для швидкості вільного від зчеплення педіпулятора під час рекуперації енергії

$$V_2 = \sqrt{\frac{4}{(m_1+\frac{m_4}{2})}\left(\left(\frac{p_0 L_o}{a} Ln\frac{L_o - a(L_3 - x_2)}{L_o - aL_3} - p_a x_2\right)\frac{\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} - f\frac{d}{2}\right)\right)}. \quad (19)$$

Умови стійкості крокуючого робота. Для стабільного руху мобільного робота необхідно визначити умови його стійкості. Ураховуючи вагу робота нормальна реакція N, яка діє на ногу з боку опорної поверхні, по якій переміщується робот, може змінюватись у межах:

$$Q_{\min} + \frac{1}{2}(m + 4m_1)g \le N \le Q_{\max} + \frac{1}{2}(m + 4m_1)g \quad (20)$$

З рівняння (10) видно, що максимальна сила F_{max}, яка діє на опорний педіпулятор (тобто на ногу, яка зчеплена з поверхнею переміщення робота) у горизонтальному напрямку, дорівнює

$$F_{\max} = \frac{m}{(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2})}\left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_o - p_a)\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} + f\frac{d}{2}\right)\right). \quad (21)$$

Умова відсутності проковзування ноги по опорній поверхні виглядає так: $f_1 N_{\min} > F_{\max}$. Підставив вирази цих параметрів, отримуємо умову стійкості мобільного робота:

$$f_1\left(Q_{\min} + \frac{1}{2}(m + 4m_1)g\right) >$$

$$\frac{m}{(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2})}\left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_o - p_a)\pi D^2}{4r_4 k}\left(\frac{ns}{2\pi} + f\frac{d}{2}\right)\right), \quad (22)$$

де f_1 – коефіцієнт тертя ковзання.

Аналіз результатів моделювання. Моделювання процесу руху мобільного робота з модулем рекуперації енергії здійснювалося за наступних початкових параметрів механічної системи робота: маса робота m = 12 кг; маса одного педіпулятора m_1 = 3 кг; маса приводної шестерні m_4 = 0,1 кг; переміщення корпуса робота на попередньому циклі руху L_3 = 0,1 м; крок гвинтової лінії гвинта s = 0,004 м; число заходів гвинтової лінії n = 3; передаточне відношення k = 0,6; коефіцієнт тертя гвинтової передачі f = 0,15; довжина газової камери пневматичного циліндра L_o = 0,05 м при мінімальному тиску в камері; діаметр пневматичного циліндра D = 0,06 м; діаметр гвинта d = 0,02 м; атмосферний тиск p_a = 1,013 бар.

На рис. 4 представлені залежності переміщень корпуса робота x_1 та вільного педіпулятора x_2 від часу t для різних значень моменту двигуна M_1 та початкового тиску p_0 в пневматичному циліндрі. З порівняння графіків рис. 4(а), коли момент двигуна дорівнює M_1 = 2 Нм, и графіків рис. 4(б), коли момент двигуна дорівнює M_1 = 1 Нм, стає очевидним, що швидкість руху робота зменшується більш ніж на 57%, але при цьому залишається досить високою.

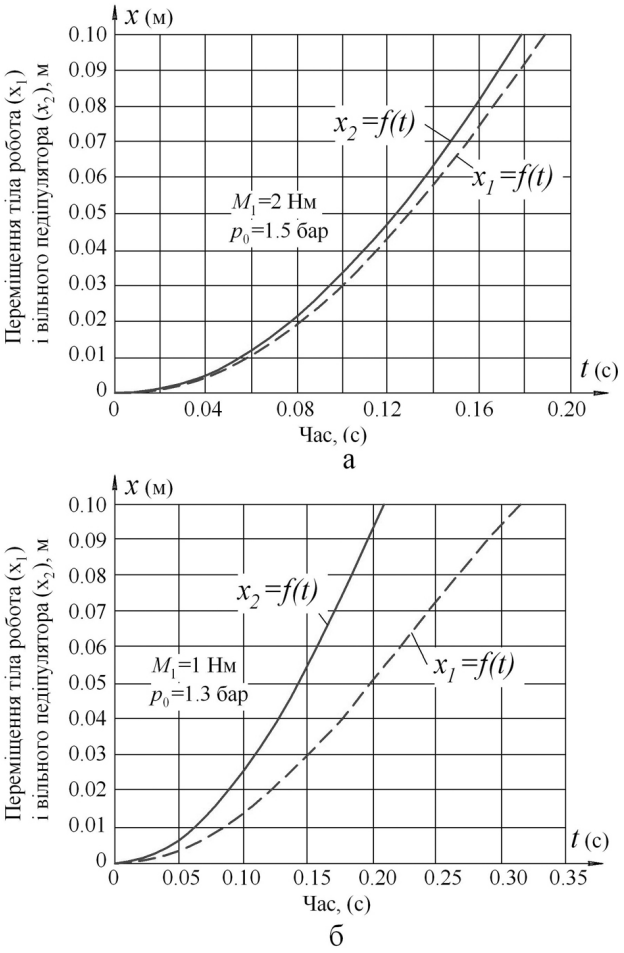


Рис. 4. Залежності переміщень корпуса робота (x_1) та вільного педіпулятора (x_2) від часу (t): а) при M_1=2 Нм, p_0=1.5 бар; б) при M_1=1 Нм, p_0=1.3 бар

Зменшення моменту двигуна сприяє зменшенню його ваги, а отже, і зменшенню гравітаційного навантаження на робот. Зменшення початкового тиску в пневматичному циліндрі (тобто тиску на початок процесу рекуперації) сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії приводу мобільного робота. Тому перевагу слід віддавати меншим значенням моменту двигуна та початкового тиску в газовій камері модуля рекуперації енергії. На рис. 5 показані графіки зміни швидкості руху самого робота та вільного

від зчеплення з поверхнею переміщення педипулятора. Зміна швидкості ілюструє прискорення руху робота. Відомо, що прискорення приводу робота не повинно перевищувати значень 2 м/с^2…2.5 м/с^2, оскільки це призводить до збільшення інерційних навантажень, отже й зменшення стійкості мобільного робота. Тому перевагу слід віддавати меншим значенням моменту двигуна та початкового тиску в газовій камері модуля рекуперації енергії, що сприятиме підвищенню стійкості мобільного робота.

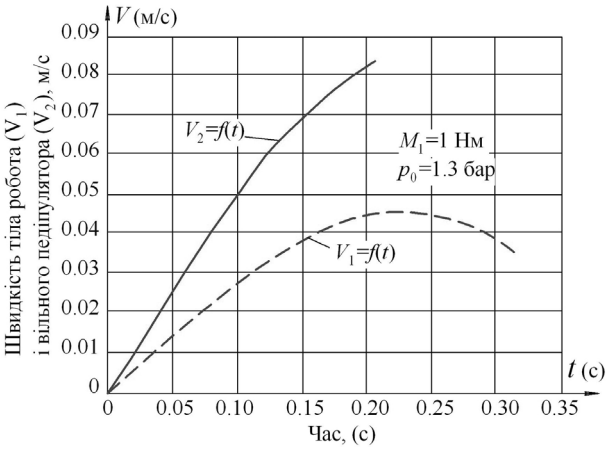


Рис. 5. Зміна швидкості руху корпусу робота V_1 та вільного педипулятора V_2

Графіки рис. 6 ілюструють зміну тиску в газовій камері (тобто пневматичному циліндрі) модуля рекуперації енергії. Очевидно, що тиск p_2 в газовій камері під час руху педипулятора зменшується до початкового значення тиску, що відповідає процесу перетворення накопиченої потенційної енергії на кінетичну енергію руху педипулятора. І, навпаки, при русі мобільного робота тиск p_1 в газовій камері збільшується, що відповідає стиску газу, тобто накопичення потенціальної енергії.

Ці процеси свідчать про адекватність розробленої динамічної моделі реальному фізичному процесу рекуперації енергії.

Висновки. У цій статті авторами запропонована принципово нова конструкція крокуючого мобільного робота, основною відмінністю якої

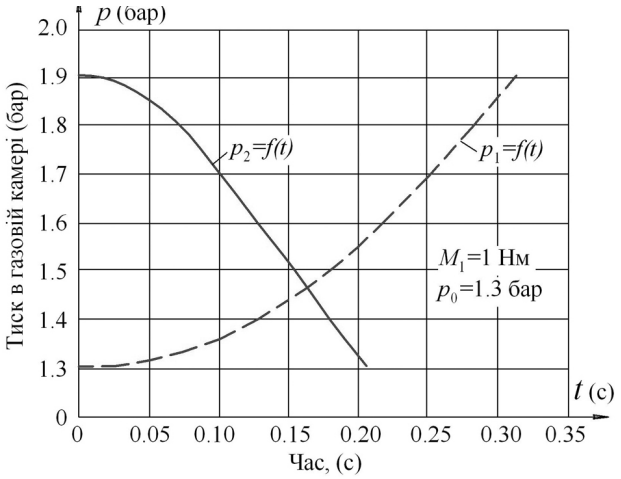


Рис. 6. Зміна тиску в газовій камері в часі при русі корпусу робота p_1 та педипулятора p_2

є наявність модуля рекуперації енергії у вигляді пневматичного циліндра і не самогальмуючої гвинтової передачі з приводом. Запропоноване технічне рішення дозволяє здійснювати накопичення потенціальної енергії стисненого повітря на кожному кроці мобільного робота і перетворювати накопичену енергію на кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці руху робота.

Розроблена динамічна модель робота з модулем рекуперації енергії та отримані диференціальні рівняння руху мобільного робота дозволили здійснити моделювання процесу рекуперації енергії. Запропоновані графоаналітичні залежності надають дослідникам та інженерам у цій галузі здійснювати проектування модулів рекуперації енергії для різних конструкцій мобільних роботів та умов їх експлуатації.

Застосування такого способу накопичення потенціальної енергії, як пневматичний акумулятор, та подальше перетворення накопиченої енергії в кінетичну енергію руху робота, надає можливість суттєво економити енергетичний ресурс автономних джерел живлення приводів крокуючих механізмів. Зрештою запропоновані результати досліджень дозволяють підвищити енергетичну ефективність мобільних роботів.

Дослідження виконувались у межах проєкту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0077 «Дрон для забору проб води».

Список літератури:

1. Manuel F. Silva and J. A. Tenreiro Machado. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. *Climbing and Walking Robots* / Behnam Miripour. London, 2010. 25 p.

2. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. Mobile robots: problems of motion control and optimization. XII All-Russian Conference on Management Problems: Proceedings of the VSPU 2014 (Moscow, June 16–17, 2014). Moscow. 2014, P. 67–78.

3. Raju D.D, Jaju S.B. Developments in wall climbing robots: a review. *International journal of engineering research and general science*. 2014. № 2. P. 35.

4. Saundersa A., Goldmanb D.I, Fullb R.J. and Buehlera M. The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design. *Boston Dynamics, Unmanned Systems Technology VIII.* Proc. of SPIE Vol. 6230. 2005. 13 p.

5. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. 178 p.

6. Polishchuk Mikhail, Oliinyk Volodymyr. Mobile climbing robot with elastic energy accumulators. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. № 1 (82), P. 116–122.

7. Mei Y., Lu Y., Hu Y, Lee C. Energy-Efficient Motion Planning for Mobile Robots. School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University. 2005. P. 6.

8. Polishchuk Mikhail, Tkach Mikhail, Parkhomey Igor, Boiko Juliy, Eromenko Oleksander. Experimental Studies on the Reactive Thrust of the Mobile Robot of Arbitrary Orientation. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics. ISSN 2089–3272. Vol. 8, No 2. 2020, P. 340–352. DOI: 10.11591/ijeei.v8i2.1681.

9. Polishchuk M., Tkach M., Stenin A. Anthropomorphic Walking Robot: Design and Simulation. FME Transactions. VOL. 50, No 4, 2022, P. 724–731, doi: 10.5937/fme2204724P.

10. Ruffieux Simon, Ijspeert Auke, Menon Carlo. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Simon Frazer University. 2008. 21 p.

11. Lazarević Mihailo. Optimal Control of Redundant Robots in Human-Like Fashion. FME Transactions, 2005, Vol. 33 (2), P. 53–64.

12. Stevanović Ilija, Rašuo Boško. Development Of a Miniature Robot Based on Experience Inspired by Nature. FME Transactions. Volume 45, 1, 2017. P. 189–191.

13. Jonathan E. Clark, Daniel I. Goldman, Tao S. Chen, Robert J. Full and Daniel E. Koditschek. Toward a Dynamic Vertical Climbing Robot. September 2006. URL: http://repository.upenn.edu/ese_papers/504

14. Industrial robots with energy recovery. Internet resource. URL: https://bstudy.net/812331/tehnika/promyshlennye_roboty_rekuperatsiey_energii (Accessed 06/06/2023)

15. Кузнєцов Ю.М., Поліщук М.М. Крокуючий мобільний робот. Патент України 121432; МПК B62 D57/032; заяв. 18.07.2018; опубл. 25.01.2019. Київ: Укрпатент, Бюл. № 2, 2019. 16 р.

Polishchuk M.M., Tkach M.M., Lutsak D.S. MOBILE WALKING ROBOT WITH MOTION ENERGY RECOVERY SYSTEM

The article is devoted to solving the problem of limited energy resources of autonomous power sources of mobile robots. It is known that the stepping transmission of mobile robots, unlike the wheeled one, has a much larger number of drives, therefore the task of saving energy resources acquires particular relevance. It is determined that a promising direction for solving the specified task is the application of the principle of energy recovery. The article proposes a fundamentally new design of the stepping transmission, which allows you to accumulate potential energy and subsequently convert it into kinetic energy of movement of the mobile robot. Each previous step of the robot is a stage of accumulation of potential energy when the electric motors are turned on, and each subsequent step, when the motors are turned off, is a stage of conversion of the accumulated energy into kinetic energy of movement. It is found that compressed air in pneumatic cylinders should be used as an energy carrier, the pistons of which are kinematically connected to the electric motors through a non-self-braking helical gear and gear wheels. The specified distinctive features constitute an aspect of technical novelty, and the scientific novelty is based on the constructed dynamic model of the movement of a walking robot, on the basis of which analytical dependencies for calculating the parameters of the robot with energy recovery modules are obtained. The article also defines the conditions for stable movement of a mobile robot, that is, the conditions of the absence of slipping of the legs on the supporting surface, taking into account the forces and speeds of movement. The graph-analytical dependencies of the movement of the robot are proposed, the transmission of which provides the possibility of accumulating and converting energy. It is proved that the application of the principle of energy recovery provides a significant saving of resources of autonomous power sources inherent in mobile robots. Thus, the energy efficiency of mobile robots increases during the performance of transport and technological operations of various purposes.

Key words: *mobile robots, walking mechanisms, anthropomorphic structures, pedipulators, energy accumulators, energy recovery.*

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/02

Лавінський Д.В.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Аніщенко Г.О.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Конкін В.М.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Конохов В.І.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ СКЛАДЕНИХ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ОБРОБКИ НАГРІТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі розглядається розрахунковий аналіз міцності складених прес-форм, для ізостатичного пресування нагрітих порошкових матеріалів. Ізостатичне пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів у складених прес-формах виготовлених з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів є одним із сучасних напрямів обробних галузей машинобудування. Ключовим моментом інтенсифікації технологічних процесів є підвищення силового впливу на заготовку, що, в свою чергу, призводить до підвищення силового впливу на елементи прес-форми. Розрахункове аналіз деформування прес-форми разом із заготовкою дозволяє зробити рекомендації стосовно раціональних значень конструкційних та експлуатаційних параметрів, за яких, по-перше, обладнання залишається працездатним, а, по-друге, досягається мета технологічної операції. У статті розглянуто розрахункові дослідження термопружного деформування системи «складена прес-форма – заготовка» з метою оцінки міцності елементів обладнання. Було розглянуто випадок рівномірного нагріву заготовки та елементів прес-форми. Розрахункові дослідження проводились із застосуванням методу скінчених елементів. Базовим обрано вісесиметричний чотирьох вузловий ізопараметричний скінченний елемент із білінійною апроксимацією температури та переміщень. Контактна взаємодію моделюється шляхом введення шарів спеціальних контактних скінченних елементів, які вводились поміж складовими частинами прес-форми та поміж прес-формою та заготовкою. Для оцінки міцності елементів прес-форми застосовано критерій Кулона-Мора. Еквівалентне напруження відповідно до цього критерію порівнювалось із граничними значеннями міцності. Наведено результати розрахунків, що ілюструють основних характеристик напружено-деформованого стану у елементах прес-форми. Виконано серію розрахунків, у яких варіювались розміри елементів прес-форми та їх вплив на показники міцності.

Ключові слова: *розрахунковий аналіз, міцність, термодеформування, ізостатичне пресування порошкових матеріалів, контактна взаємодія, метод скінченних елементів.*

Постановка проблеми. У даний час розвиток обробних технологій у машинобудуванні характеризується шляхом застосування нових інноваційних процесів. До них можна віднести й пресування порошкових матеріалів. Використання порошкових матеріалів дозволяє з меншими технологічними затратами одержувати вироби необхідної форми, також в на етапі створення коригувати фізико-механічні властивості готових виробів Технологія пресування порошків широко

застосовується для обробки надміцних тугоплавких матеріалів типу карбіду вольфраму, кобальту, нікелю у тому числі й із застосуванням їх нагріву.

При подібних технологічних операціях інтенсивному навантаженню піддається обладнання прес-форми. Збільшення інтенсивності впливу на заготовку призводить до збільшення силового впливу на елементи прес-форми, що може викликати втрати працездатності за рахунок руйнування.

Розрахунковий аналіз міцності дозволяє визначати раціональні значення конструкційних та експлуатаційних параметрів, за яких прес-форма залишається працездатною, а мета технологічної операції – досягається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент існує достатньо інформаційних джерел, у яких докладно висвітлені принципи та сучасні тенденції розвитку технологічних операцій пресування порошкових матеріалів. Наприклад, можна відзначити роботи [1–5]. Роботи [1–3] можна розглядати як такі, що дають вичерпну картину існуючих сучасних технологічних операцій порошкової металургії. Роботи [4, 5] розкривають тенденції розвитку технологій обробки порошків із застосуванням електромагнітного поля. Для підвищення щільності виробів, які одержуються, а також при обробці порошків високоміцних матеріалів застосовується технологія ізостатичного пресування у холодному та гарячому варіантах [6, 7]. У другому варіанті заготовка попередньо піддається нагріву. Температура заготовки при цьому може спричиняти значний нагрів елементів прес-форми, що, в свою чергу, призводить до додаткового термомеханічного навантаження на них.

За складних умов експлуатації можна використовувати для виконання елементів прес-форми вуглець-вуглецевий композитний матеріал (ВВКМ), який має високі механічні властивості при підвищених температурах [8, 9].

Сучасний підхід до проектування складних технічних та технологічних систем потребує проведення попереднього розрахункового аналізу, який в тому числі має містити аналіз деформування з метою оцінки міцності. Стосовно технологій обробки порошкових матеріалів розрахунки деформування можуть дати відповідь на два питання: стосовно міцності елементів прес-форми та стосовно досягнення необхідних показників заготовки. Приклади проведення подібного розрахункового аналізу містяться у роботах [10, 11], де в якості чисельного методу розрахунку використовується метод скінченних елементів (МСЕ).

Проведений аналіз відкритих інформаційних джерел дає змогу констатувати, що тема дослідження є актуальною у науковому і практичному сенсі.

Постановка завдання. На рис. 1 та 2 представлені розрахункові схеми складених прес-форм для виготовлення порожнистих і суцільних виробів з порошкових матеріалів.

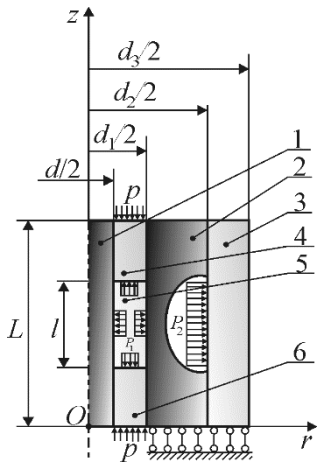


Рис. 1. Розрахункова схема прес-форми для виготовлення порожнистих виробів з порошків: 1 – центральний стержень; 2 – вкладиш; 3 – матриця; 4, 6 – пуансон; 5 – брикет з порошку

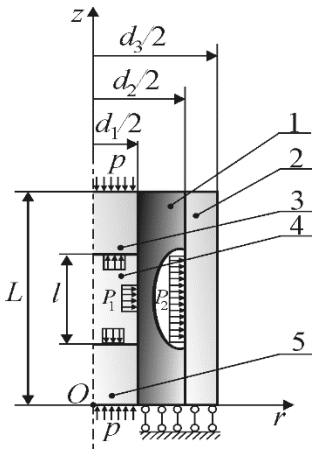


Рис. 2. Розрахункова схема прес-форми для виготовлення суцільних виробів з порошків: 1 – центральний стержень; 2 – вкладиш; 3 – матриця; 4, 6 – пуансони; 5 – брикет з порошку

Прес-форми мають такі розміри: d_1 = 340 мм, d_3 = 340 мм, L = 380 мм. Вироби можуть мати різну висоту (l), яка задається відносно висоти прес-форми (L). Розглядаються наступні

варіанти: l / L = 0,250; 0,315; 0,395; 0,470; 0,550. Навантаженість вкладиша і матриці залежить від співвідношення їх товстостінностей, які можна визначити відношенням зовнішнього діаметра вкладиша (d_2) до зовнішнього діаметра матриці (d_3) при фіксованому діаметрі пресованого виробу (d_1). Розглядаються наступні варіанти: d_2 / d_3 = 0,723; 0,787; 0,850. При аналізі деформування прес-форм для виготовлення порожнистих виробів варіювався діаметр центрального стержня (d) в залежності від висоти прес-форми (L): d / L = 0,15; 0,2; 0,25.

Тиск, що задається p і який прикладається до верхнього і нижнього пуансонів, може бути отриманий в залежності від поздовжньої сили P. Нижній торець вкладиша і матриці закріплений – тут задаються нульові переміщення. Показані контактні тиски p_1 і p_2 визначаються в процесі розв'язання контактної задачі. При визначенні розподілу температури у елементах прес-форми джерелом температури розглядалась рівномірно нагріта заготовка.

У таблиці 1 приведені фізико-механічні характеристики матеріалів елементів прес-форми, які використовувалися у подальших розрахунках.

Ціллю роботи є про ведення аналізу міцності прес-форм з метою визначення найбільш небезпечних співвідношень конструктивних параметрів з точки зору найбільшої навантаженості її елементів.

Виклад основного матеріалу. Розв'язання проводилось для випадку рівномірного нагріву усіх елементів прес-форми до температури 1800 ºС. У якості чисельного методу аналізу використовувався МСЕ.

Умови навантаження, закріплення і розподілу температури в реальній прес-формі практично не залежать від окружної координати, що дозволяє розглядати задачу в вісесиметричній постановці. Розподіл основних характеристик процесу деформування розглядався у рамках термопружної постановки. Базовим скінченним елементом обрано ізопараметричний чотирьох вузловий елемент із білінійною апроксимацією температури та переміщень.

Окремі питання стосувались урахуванню контактної взаємодії – для цього на межах контакту вводились спеціальні контактні шари. Для дискретизації контактних шарів використані спеціальні контактні скінченні елементи, властивості яких задавалися відповідно до рекомендацій, наведених у роботі [12]. Відзначимо, що коефіцієнт тертя на межах розділу пуансон – вкладиш, і вкладиш – матриця задавався рівним 0,18; на межах розділу вкладиш – заготовка рівним 0,22.

Графіт і ВВКМ відносяться до крихких матеріалів, які мають різні значення межі міцності на розтяг та стиск, тому для оцінок працездатності елементів прес-форми будемо використовувати критерій Кулона-Мора, еквівалентне напруження, згідно із яким обчислюється так:

$$\sigma_{Mo} = \sigma_1 - \frac{\sigma_{Bp}}{\sigma_{Bc}}\sigma_3$$

де σ_1 та σ_3 – перше та третє головне напруження, σ_{Bp} та σ_{Bc} – значення границь на розтяг та стиск.

На рис. 3 та 4 наведені розподіли еквівалентних напружень σ_{Mo} у меридіональних перерізах складених прес-форм для виготовлення суцільних і порожнистих і виробів.

Наведені дані дозволяють сформулювати загальні закономірності деформування прес-форм, які справедливі при різних співвідношеннях геометричних розмірів елементів і також справедливі для обох типів прес-форм. Найбільш навантаженими є елементи прес-форм, які безпосередньо контактують із заготовкою, а також область матриці, що контактує із вкладишем. Найбільші значення еквівалентних напружень σ_{Mo} спостерігаються в околі верхнього торця матриці. При розглянутій величині зовнішнього тиску (30 МПа) максимальні значення σ_{Mo} у елементах прес-форми, що виконані з ВВКМ (пуансони

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики матеріалу елементів прес-форми

	Пуансони (ВВКМ)	**Матриця (ВВКМ)**	**Вкладиш, центральний стержень (графіт АРВ-1)**
E, ГПа	18	18	10,5
ν	0,19	0,19	0,2
$(\sigma+)_в$, МПа	100	100	15
$(\sigma-)_в$, МПа	110	110	51,5
$\alpha_т$, 1/°С	$3{,}5\times10^{-6}$	$3{,}5\times10^{-6}$	6×10^{-6}
ρ, кг/м3	1500	1500	1600
λ, Вт/(м·К)	130	130	120
c, Дж/(кг·К)	1700	1700	1700

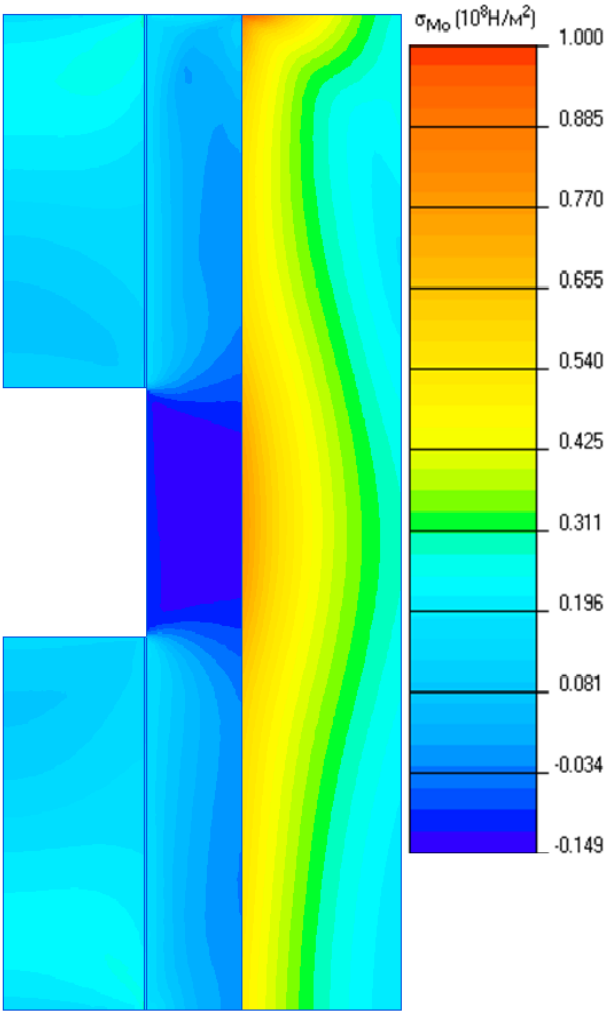


Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень за теорією Кулона-Мора (пресування суцільних виробів)

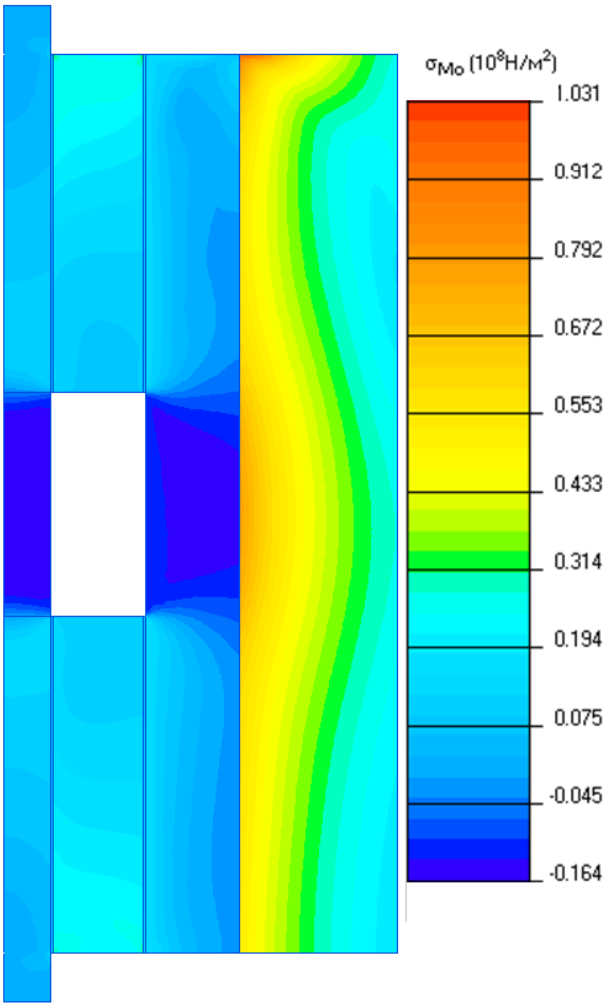


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень за теорією Кулона-Мора (пресування порожнистих виробів)

та матриця), дорівнюють приблизно 77 МПа у центральній зоні та приблизно 100 МПа в околі верхнього торця матриці. Таким чином, за розглянутих умов навантаження та конструкційних параметрах максимальні еквівалентні напруження σ_{Mo} не перебільшують межі міцності на розтяг для ВВКМ, і можна стверджувати, що пуансони та зовнішня матриця залишаються працездатними.

Що стосується вкладишу та центрального стержня з графіту, то максимальні значення σ_{Mo} спостерігаються не в зоні максимальної навантаженості (біля заготовки), а на віддаленні до торців, причому величина σ_{Mo} є більшою за межу міцності на розтяг для графіту. У центральній зоні стержню та вкладишу величина σ_{Mo} є від'ємною. Поясненням цьому є особливість напруженого стану у цій зоні – усі головні напруження є від'ємними (рис. 5). Тобто, для даної зони відповідних елементів прес-форми критерій Кулона-Мора не є об'єктивним. У даному випадку можна робити оцінювання за величиною найменшого головного напруження (σ_3) у порівнянні із межею міцності на стискання. Максимальне значення σ_3 за модулем складає приблизно 67 МПа, що більше ніж межа міцності на стиск графіту (51,5 МПа). Аналіз напруженого стану вкладишу та центрального стержня підтверджує положення, що ці конструктивні елементи не витримують більш ніж одне пресування.

Далі розглянемо більш докладно напружений стан матриці, як основного елементу, що забезпечує працездатність прес-форми. Встановимо, при виготовленні яких виробів (суцільних або порожнистих) матриця є найбільш навантаженою. На рис. 6 наведено графіки розподілу еквівалентних напружень σ_{Mo} уздовж внутрішньої поверхні матриці. Якісний розподіл в обох

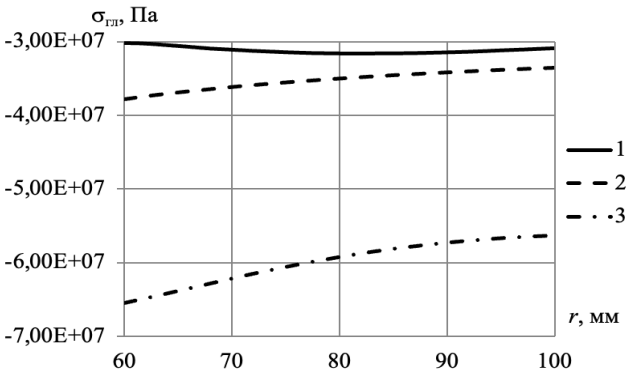


Рис. 5. Розподіл головних напружень за товщиною вкладиша ($z = L/2$): 1 – σ_1, 2 – σ_2, 3 – σ_3

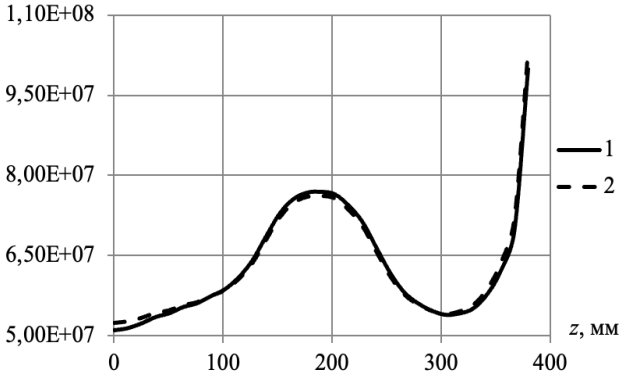


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень згідно критерію Кулона-Мора вздовж внутрішньої поверхні матриці: 1 – пресування суцільних виробів, 2 – пресування порожнистих виробів; (l/L = 0,250)

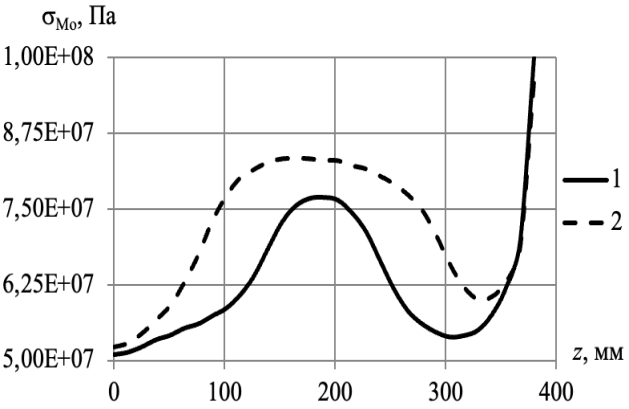


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень згідно критерію Кулона-Мора вздовж внутрішньої поверхні матриці при різних розмірах пресованого виробу: 1 – l/L = 0,250; 2 – l/L = 0,550

випадках є ідентичним. Кількісно спостерігаються деякі відмінності, проте вони не перевищують 3%. Можна стверджувати, що при виготовленні виробів обох типів однакової висоти зовнішня матриця є навантаженою практично однаково. Результати аналізу напруженого стану зовнішньої матриці, одержані при для одного з типів виробів можуть бути поширені і на інший тип.

Наступна серія розрахунків була проведена з метою з'ясування впливу висоти виробу на напружений стан матриці. На рис. 7 представлені графіки, які ілюструють розподіл еквівалентного напруження σ_{Mo} вздовж внутрішньої поверхні матриці для двох випадків: l/L = 0,250 та l/L = 0,550.

Як видно, при пресуванні виробу більшої висоти мають місце більші значення еквівалентного напруження σ_{Mo}, особливо відчутне це збільшення у центральній зоні матриці, яка знаходиться на одному рівні із заготовкою. Різниця у цих значеннях складає приблизно 20%. Відзначимо, що за усіх розглянутих варіантів висоти заготовки матриця залишається працездатною. Також відзначимо, що у випадку заготовки найбільшої висоти (l/L = 0,550) на ділянці поверхні матриці, порівнянному за розмірами з пресованою заготовкою, еквівалентні напруження σ_{Mo} змінюються слабко, в цьому випадку можна стверджувати, що ця ділянка внутрішньої поверхні матриці навантажена практично рівномірно. При зменшенні висоти пресованого виробу, знижуються як максимальні напруження, що діють в матриці (в середньому на 4% при кожному наступному розмірі пресованого виробу), так і збільшується неоднорідність розподілу напружень уздовж внутрішньої поверхні матриці.

Висновки. В роботі розглянуті питання розрахункового аналізу міцності складених прес-форм, призначених для виготовлення шляхом гарячого ізостатичного пресування виробів з порошків надміцних тугоплавких сполук. Розглянуто прес-форми для виготовлення суцільних та порожнистих виробів. Чисельні дослідження виконані із застосуванням методу скінченних елементів, поміж складових перс-форми враховані умови контактної взаємодії. Розрахунковим шляхом визначені найбільш навантажені елементи прес-форм та встановлені межі значень конструктивних параметрів, при яких прес-форми залишаються працездатними.

Подальші дослідження стосуються розрахунків деформування прес-форм з урахуванням залежності фізико-механічних властивостей від рівня температури.

Список літератури:

1. Thümmler F., Oberacker R. An introduction to powder metallurgy. CRC Press., 2024. 325 p.
2. Angelo P. C., Subramanian R., Ravisankar B. Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd., 2022. 323 p.
3. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Нгуен К. К., Радченко Л. О. Одержання біметалів методами порошкової металургії (Огляд). *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. Київ : ІПМ НАН України. 2011. Вип. 20. С. 101–107.
4. Thirupathi N., Kumar R., Kore S. D. (2022). Effect of electromagnetic force on the strength of electromagnetic impulse powder compaction. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 31. No. 12. P. 10021–10034.
5. Mamalis A. G., Manolakos D.E., Kladas A.G., Koumoutsos A.K. Electro-magnetic tooling for metal forming and powder compaction: numerical simulation. *High Speed Forming*: Proceedings of the 1 st International Conference. 2004. P. 143–154.
6. Шеремет В. І., Втерковський М. Я., Тесля С. Ю., Соловйова Т. О. Оптимізація процесу холодного ізостатичного пресування порошків магнію та його сплавів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ. 2024. Том 1. Вип. 79–80. С. 65–69.
7. Atkinson H. V., Davies S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31. No. 12. P. 2981–3000.
8. Devi G.R., Rao K.R. Carbon-Carbon Composites – An Overview. *Def. Sci. J.* 1993. Vol. 43. P. 369–383.
9. Anilas K., Surendranathan A.O. Carbon-Carbon composites – A review. *UPI Journal of Engineering and Technology.* 2018. Vol. 1. No. 1. P. 8–19.
10. Coube O., Riedel H. (2000). Numerical simulation of metal powder die compaction with special consideration of cracking. *Powder Metallurgy*. 2000. Vol. 43. No. 2. P. 123–131.
11. Thirupathi N., Kumar R., Kore S. D. Non-coupled finite element modelling of electromagnetic radial compaction of pure Aluminium powder. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2023. Vol. 24. No. 3. P. 325–336.
12. Lavinskii D.V., Bondar' S.V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures . *Strength of materials*. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 447–454.

Lavinsky D.V., Anischenko G.O., Konkin V.M., Konokhov V.I. COMPUTATIONAL STRENGTH ANALYSIS OF FOLDED MOLDS FOR PROCESSING HEATED POWDER MATERIALS

The paper considers the computational analysis of the strength of composite molds for isostatic pressing of heated powder materials. Isostatic pressing of heated powders of high-strength materials in composite molds made of carbon-carbon composite materials is one of the modern directions of the processing branches of mechanical engineering. The key point of intensification of technological processes is the increase in the force effect on the workpiece, which, in turn, leads to an increase in the force effect on the mold elements. The computational analysis of the deformation of the mold together with the workpiece allows us to make recommendations regarding the rational values of the structural and operational parameters, under which, firstly, the equipment remains operational, and, secondly, the goal of the technological operation is achieved. The article considers computational studies of the thermoelastic deformation of the "assembled mold – workpiece" system in order to assess the strength of the equipment elements. The case of uniform heating of the workpiece and the elements of the mold was considered. Computational studies were carried out using the finite element method. The basic one was an axisymmetric four-node isoparametric finite element with a bilinear approximation of temperature and displacements. The contact interaction is modeled by introducing layers of special contact finite elements, which were introduced between the components of the mold and between the mold and the workpiece. To assess the strength of the mold elements, the Coulomb-Mohr criterion was used. The equivalent stress according to this criterion was compared with the limit values of strength. The results of calculations are presented, illustrating the main characteristics of the stress-strain state in the mold elements. A series of calculations was performed, in which the dimensions of the mold elements and their influence on the strength indicators were varied.

Key words: *computational analysis, strength, thermal deformation, isostatic pressing of powder materials, contact interaction, finite element method.*

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 629.5.036.086:534.832:681.586
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/03

Холденко В.І.
Одеський національний морський університет

МЕТОДИ ОЦІНКИ СТАНУ СУДНОВИХ НАСОСІВ НА ОСНОВІ ВІБРАЦІЙНОЇ ТА АКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Забезпечення безперебійної і надійної роботи суднових насосів є ключовим чинником ефективної експлуатації суднових енергетичних установок. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах сучасних вимог до автоматизації технічного обслуговування, енергоефективності та скорочення витрат на ремонт суднового обладнання. Мета дослідження полягає у визначенні найбільш інформативних фізичних параметрів та обґрунтуванні ефективних методів їх аналізу для оцінки стану суднових насосів в умовах реальної експлуатації.

У роботі проаналізовано специфіку формування вібраційних та акустичних сигналів при пошкодженнях типу розбалансування, зношення підшипників, кавітації, ослаблення кріплень тощо. Виокремлено спектральні ознаки дефектів, зокрема амплітуди на гармоніках 1X–3X, широкосмугові імпульсні збурення та зміни в характері шуму в діапазоні 4–12 кГц. Здійснено критичний огляд сучасних засобів збору даних (акселерометри, гідрофони), способів монтажу сенсорів, а також інструментів обробки сигналів: швидке перетворення Фур'є (FFT), аналіз огинаючої, вейвлет-декомпозиція та кореляційний аналіз. Наведено узагальнені характеристики кожного з методів із точки зору їх придатності до умов морської експлуатації і типових пошкоджень.

Особливу увагу приділено перспективам використання інтелектуальних алгоритмів, зокрема нейромережевих і гібридних моделей, які забезпечують високу точність класифікації технічного стану агрегатів. Запропоновано напрями удосконалення діагностичних систем: впровадження сенсорів нового покоління з підвищеною чутливістю, автоматизація процесу аналізу та інтерпретації сигналів, інтеграція систем у бортове обладнання з урахуванням специфіки морського середовища. Узагальнено практичні рекомендації щодо адаптації методів до суднових умов, а також підготовки технічного персоналу до роботи з діагностичними платформами.

Результати дослідження мають прикладне значення для проєктування систем технічного моніторингу, удосконалення процедур технічного обслуговування суднових механізмів і підвищення ефективності управління технічним станом флоту. Отримані висновки сприятимуть формуванню уніфікованого підходу до оцінки стану насосного обладнання з урахуванням мультисенсорних даних, адаптивних алгоритмів та умов морської експлуатації.

Ключові слова: *технічна діагностика, суднове обладнання, спектральний аналіз, вібрація, акустичний шум, нейронні мережі, сенсорні системи.*

Постановка проблеми. Функціональна надійність суднових допоміжних механізмів, зокрема насосного обладнання, є визначальним чинником безпеки й ефективності експлуатації суднових енергетичних установок. У сучасних умовах, коли судноплавна галузь стикається з підвищеними вимогами до енергетичної ефективності, екологічної безпеки й автоматизації, проблема своєчасного виявлення відмов і зниження технічних ресурсів елементів насосних систем набуває особливої актуальності. Насамперед, це стосується внутрішніх пошкоджень, які не виявляються візуально і проявляються лише в умовах реального навантаження [1, с. 350–351].

Традиційні методи контролю, які ґрунтуються на плановому технічному обслуговуванні, виявляються недостатньо ефективними в умовах інтенсивної експлуатації суднових агрегатів. У цьому контексті вібраційна й акустична діагностика демонструють суттєві переваги, оскільки дозволяють оперативно виявляти передаварійні стани без демонтажу

обладнання [2, с. 153]. Проте на практиці все ще існує низка обмежень щодо точності оцінки, адекватності математичних моделей та адаптивності діагностичних алгоритмів до специфіки роботи насосного обладнання в умовах морського середовища [3].

Дослідження демонструють, що характерні ознаки відмов насосів, такі як розбалансування, кавітація, зношення підшипників чи деформації робочого колеса, супроводжуються змінами в спектральній структурі сигналів вібрації і шуму. Водночас складність інтерпретації цих сигналів часто обумовлена впливом зовнішніх чинників: змінного навантаження, температури, вібрацій корпусу судна тощо. У результаті, без належної обробки сигналів і системного підходу до їх інтерпретації, ризик хибних висновків залишається високим.

Також актуальність дослідження зумовлена потребою в стандартизації методик діагностики, адаптованих до умов експлуатації суднових насосів різних типів. Попри наявність окремих моделей і рішень, відсутня уніфікована система оцінки технічного стану, що ускладнює впровадження сучасних технологій у судноремонтній практиці та технічному менеджменті флоту [4].

Таким чином, визначення ефективних підходів до оцінки технічного стану суднових насосів із використанням вібраційної та акустичної діагностики під час реальної експлуатації є важливим науковим і практичним завданням. Воно має ключове значення для забезпечення безперебійної роботи суднових енергетичних систем, зниження витрат на ремонт і підвищення технічної готовності флоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття спостерігається активізація досліджень у сфері технічної діагностики суднових агрегатів, зокрема насосного обладнання. Актуальність цієї проблематики зумовлена зростанням складності суднових енергетичних установок, потребою у зменшенні витрат на обслуговування та підвищенні рівня безпеки морських перевезень.

Серед вітчизняних наукових розвідок слід виокремити статтю О. Мельника та В. Сороки, які запропонували інтегровану методику вібраційної діагностики суднових енергетичних установок на основі аналізу спектральних характеристик сигналів. Автори справедливо підкреслюють доцільність поєднання кількох методів діагностування для виявлення прихованих дефектів, однак проблема диференціації відмов за джерелами коливань залишається відкритою [1].

Певне поширення отримали підходи до цифрової діагностики на базі систем «Інтернету речей» (IoT). Так, А. Кабук (A. Cabuk) у межах експериментального дослідження застосував платформу Node-RED для виявлення несправностей у моторі насоса системи охолодження головного двигуна. Незважаючи на технологічну новизну, науковець зосереджується переважно на реалізації апаратної частини, залишаючи поза увагою специфіку обробки вібраційно-акустичних сигналів в умовах морської експлуатації [5].

В аспекті надійності приводних електродвигунів насосів актуальними є праці С. Тараненка та С. Голубєвої, які застосували логіко-ймовірнісні методи (зокрема «дерево відмов») для прогнозування відмов [6] і проаналізували основні показники надійності суднових електроприводів [7]. Попри високий ступінь формалізації моделей, роботи не охоплюють акустичну діагностику, що є суттєвим обмеженням у контексті цілісної оцінки стану насосного агрегата.

Серед закордонних досліджень слід виокремити роботу К. Діонісіу (K. Dionysiou) та ін., які запропонували функціонально-модельний підхід до оцінки надійності систем змащення круїзного судна [8]. Незважаючи на загальносистемний рівень моделювання, запропоновані підходи потенційно придатні для аналізу насосного обладнання в контексті інтегрованих енергетичних систем.

Особливу увагу привертає дослідження О. Шарка (O. Sharko) та А. Яненка (A. Yanenko), присвячене застосуванню марковських моделей для інтелектуального моніторингу стану компонентів суднової енергетичної установки [9]. Хоча дослідження не фокусується безпосередньо на насосах, запропонована модель відкриває перспективи для інтеграції акустичних і вібраційних даних у прогнозні алгоритми.

Системний огляд сучасних підходів до діагностики гідравлічних насосів представлений у статті Й. Ян (Y. Yang) та ін., де узагальнено методи обробки сигналів і тенденції впровадження цифрових технологій у цій сфері. Автори визнають відсутність єдиного стандарту оцінювання технічного стану, що ускладнює практичне впровадження в морській галузі [3]. Подібні проблеми ідентифіковано в огляді Х. Ху (X. Xu) та ін., де наголошується на обмеженості сучасних підходів до моніторингу морських енергетичних систем через надмірну генералізацію

моделей [10]. Підтвердженням цьому є також стаття М. Паяк (M. Pająk) та ін., де методи машинного навчання застосовано до діагностики дизельних двигунів суден, однак залишається відкритим питання щодо їхньої адаптації до насосних вузлів [11].

Нестандартний підхід до діагностики запропонували Дж. Гіртлер (J. Girtler) та Й. Рудницький (J. Rudnicki), які розглядають феномен квантових ефектів у роботі морських машин [12]. Незважаючи на теоретичну привабливість, застосування даної концепції до вібраційної та акустичної діагностики наразі не має практичної реалізації.

Результати застосування методів ШІ до діагностики турбокомпресорів суднових двигунів представлені в статті А. Адамкевич (A. Adamkiewicz) та П. Ніконьчук (P. Nikończuk) [13]. Методологія цього дослідження потенційно адаптивна до насосів, проте потребує ґрунтовного емпіричного підтвердження.

Варто також зазначити про контекст професійної підготовки суднових механіків, висвітлений у публікації А. Кононенка та В. Слабко, де йдеться про важливість неперервного оновлення знань у сфері технічної експлуатації [14], а також про ширший інженерний контекст використання допоміжного обладнання, поданий у монографії В. Чимшира [15].

Узагальнюючи огляд, слід зазначити, що більшість наявних досліджень зосереджуються або на загальних підходах до діагностики суднових систем, або на прикладних рішеннях, не пов'язаних безпосередньо з насосним обладнанням. У цьому вбачається суттєва наукова прогалина, яка полягає у відсутності комплексного підходу до оцінки технічного стану суднових насосів з урахуванням специфіки їх роботи, складових чинників вібраційного й акустичного впливу та умов експлуатації на морі. Таким чином, доцільним є подальший розвиток досліджень у напрямі формалізації діагностичних алгоритмів, адаптації інтелектуальних моделей до реальних експлуатаційних сценаріїв, а також інтеграції мультисенсорних даних для забезпечення високої достовірності діагностичних висновків.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження методів оцінки стану суднових насосів на основі вібраційної та акустичної діагностики під час експлуатації. Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання дослідження:

Дослідити основні фізичні параметри, що супроводжують роботу суднових насосів і можуть бути використані як інформативні ознаки технічного стану агрегатів при вібраційній та акустичній діагностиці в експлуатаційних умовах.

Проаналізувати сучасні методики збору, обробки та інтерпретації вібраційних і шумових сигналів, що застосовуються для діагностики насосного обладнання, з урахуванням особливостей морського середовища, конструктивної складності та змінного режиму роботи механізмів.

Сформулювати практичні рекомендації щодо вдосконалення методів діагностики стану суднових насосів, зокрема у частині вибору сенсорів, адаптації алгоритмів обробки сигналів та інтеграції діагностичних систем у структуру технічного менеджменту флоту.

Виклад основного матеріалу. Діагностування технічного стану суднових насосів в умовах експлуатації є складним завданням, що передбачає аналіз множини параметрів. Основними інформативними ознаками стану є амплітудно-частотні характеристики вібрації корпусу, гідравлічних пульсацій і спектр акустичного випромінювання.

Умовні дефекти, такі як дисбаланс, розцентрування, ослаблення кріплень, зношення підшипників або кавітація, мають відмінні вібраційні ознаки. Наприклад, дисбаланс ротора спричиняє зростання амплітуди коливань на частоті обертання (1X), а розцентрування — появу гармонік на 2X і 3X [6, с. 152–154]. Зношення підшипників проявляється широкосмуговим вібраційним фоном та імпульсними пульсаціями [2; 3]. При цьому акустичний шум набуває характерного підвищеного рівня в діапазоні 4–10 кГц.

У таблиці 1 відображено типові ознаки несправностей насосного обладнання за вібраційними й акустичними показниками. Таким чином, на основі аналізу спектральних і часових характеристик вібраційного й акустичного полів можна здійснювати попереднє розпізнавання типу несправностей.

Для оцінки стану насосів застосовуються п'єзоелектричні датчики прискорення, які монтуються на корпус агрегату. Використання акселерометрів дозволяє ефективно виявляти спектральні компоненти сигналу до 10 кГц [6, с. 152]. Акустичні сенсори (гідрофони) встановлюють безпосередньо в напірній або всмоктувальній трубопроводах для аналізу

Таблиця 1

Характерні вібраційні та акустичні ознаки несправностей суднових насосів

Тип несправності	Ознаки вібрації	Ознаки акустичного сигналу
Дисбаланс	Амплітуда зростає на частоті 1X	Гул на низьких частотах (до 1 кГц)
Розцентрування	Поява гармонік 2X, 3X	Ритмічні коливання у діапазоні 1–2 кГц
Зношення підшипників	Імпульси, широкосмуговий шум	Скрегіт, висока частота (5–10 кГц)
Кавітація	Стохастичний спектр, сплески шуму	Шарудіння, шум у діапазоні 6–12 кГц
Ослаблення кріплень	Резонансні сплески при зміні режиму	Варіативність тону, нестаціонарний шум

Джерело: узагальнено автором на основі даних [*2; 3; 6, с. 152–154; 11*].

шумових характеристик, що супроводжують гідравлічні процеси [4; 5].

Подальша обробка сигналів здійснюється методами швидкого перетворення Фур'є (FFT), аналізу огинаючої, а також вейвлет-декомпозиції. Зокрема, FFT дозволяє встановити частотні компоненти сигналу, що відповідають типам дефектів. Аналіз огинаючої – ефективний для виявлення імпульсних збурень при руйнуванні контактних поверхонь підшипників. Основні методи обробки (табл. 2) дозволяють перейти від «сирого» сигналу до формалізованого набору ознак, на основі яких здійснюється автоматичне діагностичне рішення. Варто також зазначити, використання штучних нейронних мереж забезпечує точність класифікації станів насосів на рівні понад 90%.

На основі проведеного аналізу запропоновано декілька напрямів покращення діагностики насосів. По-перше, необхідно впроваджувати сучасні сенсори з кращими характеристиками: високочутливі акселерометри та ультразвукові гідрофони значно розширюють можливості виявлення дрібних дефектів. Бездротові мережі збору даних та автономні периферійні обчислювальні модулі прискорюють введення технічного стану насосів у систему моніторингу судна.

По-друге, рекомендовано розвивати алгоритмічний супровід діагностики. Застосування нейромережевих і гібридних моделей (з нечіткою логікою) дозволяє підвищити точність розпізнавання складних дефектів та адаптувати систему до змінних умов експлуатації. Також доцільно використовувати інтелектуальні системи спостереження, що безперервно аналізують сигнали в реальному часі та самонавчаються на основі накопиченої історії станів.

По-третє, важливим є технічний супровід діагностики. Це передбачає регулярну калібровку датчиків, стандартизацію методик зняття даних та інтеграцію діагностичних систем із бортовою автоматикою. Впровадження «Інтернету речей» (IoT) та платформ для візуалізації робить інформацію про стан насосів доступнішою та сприяє ефективному прийняттю рішень під час експлуатації. У таблиці 3 сформовано ключові рекомендації щодо вдосконалення діагностики насосів. Зокрема, акцент робиться на впровадженні новітніх сенсорів та оптимізації алгоритмів аналізу. Як показано, поєднання високотехнологічних

Таблиця 2

Основні методи обробки діагностичних сигналів насосів

Метод	Призначення	Метод
FFT-аналіз	Визначення гармонік, прив'язаних до механічних дефектів	FFT-аналіз
Вейвлет-аналіз	Виявлення імпульсних збурень у часі	Вейвлет-аналіз
Аналіз огинаючої	Виявлення підповерхневих дефектів підшипників	Аналіз огинаючої
Кореляційний аналіз	Встановлення зв'язку між вібраційними джерелами	Кореляційний аналіз

Джерело: узагальнено автором на основі даних [*4; 5; 7, с. 7–9; 11*].

Таблиця 3

Рекомендації щодо вдосконалення діагностики суднових насосів

Напрям вдосконалення	Заходи
Сенсори	Застосування високочутливих акселерометрів, гідрофонів; безконтактних датчиків; IoT-інтеграція
Алгоритми	Використання машинного навчання, нейромереж; адаптивних експертних систем, обробки в реальному часі
Технічний супровід	Стандартизація зняття даних, калібрування обладнання; інтеграція з бортовими системами моніторингу

Джерело: власна розробка автора.

датчиків з інтелектуальними алгоритмами дозволяє значно підвищити надійність оцінки стану агрегатів.

Отже, проведений аналіз фізичних параметрів і методів їх обробки дозволяє сформулювати рекомендації щодо поліпшення діагностики суднових насосів. Застосування сучасних сенсорів, вдосконалених алгоритмів і належного технічного супроводу забезпечить підвищення надійності моніторингу та своєчасне виявлення відхилень у роботі насосного обладнання.

Висновки. Забезпечення надійної і безаварійної роботи суднових насосів залишається одним із ключових завдань технічної експлуатації суден у межах сучасних транспортних технологій. З огляду на складність і вартісність ремонтних операцій, особливо в умовах експлуатації у морі, актуальність розробки та впровадження ефективних методів діагностики технічного стану допоміжного насосного обладнання є беззаперечною. Вібраційна й акустична діагностика набули значного поширення завдяки своїй чутливості до ранніх проявів дефектів і можливості функціонування без демонтажу агрегатів.

Проведене дослідження дозволило встановити, що інформативними параметрами для оцінки стану насосів є характерні спектральні та часові характеристики вібрацій і шумів. Їх аналіз надає можливість виявляти типові несправності, як-от дисбаланс, кавітація, зношення підшипників, порушення кріплень тощо. Визначені ознаки можуть слугувати основою для побудови класифікаційних моделей технічного стану.

У рамках дослідження узагальнено сучасні методи збору, обробки та інтерпретації сигналів, зокрема, швидке перетворення Фур'є, аналіз огинаючої і вейвлет-декомпозиція, які забезпечують достатню діагностичну точність навіть за умов зашумленого середовища. Також проаналізовано можливості використання інтелектуальних алгоритмів, які здатні адаптивно підлаштовуватися під змінні експлуатаційні режими насосного обладнання.

На основі отриманих результатів сформульовано низку практичних рекомендацій до вдосконалення діагностичних систем: застосування сенсорів нового покоління, інтеграція методів обробки сигналів у реальному часі, автоматизація інтерпретації результатів, та адаптація методів до морських умов експлуатації. Це дозволяє створити надійну систему технічного моніторингу, що може бути вбудована в загальну структуру суднових систем технічного обслуговування.

Результати дослідження мають прикладну цінність для судноплавних компаній, судноремонтних підприємств, конструкторських бюро морської техніки, а також можуть бути впроваджені в навчальні програми морських закладів вищої освіти. Подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію автоматизованих алгоритмів технічної діагностики з урахуванням мультисенсорної інтеграції, розробку адаптивних діагностичних платформ для мобільного контролю стану агрегатів, а також апробацію запропонованих методів на широкому спектрі насосного обладнання різного призначення та типу. Особливу увагу варто приділити створенню уніфікованих нормативних рішень, які регламентуватимуть застосування вібраційно-акустичних методів у морській галузі.

Список літератури:

1. Мельник О., Сорока В. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні* науки. 2023. № 47. С. 349–359. URL: https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 (дата звернення: 28.05.2025).

2. Курносенко Д. Методи дослідження параметрів працездатності елементів системи мащення та трибосполучень суднових двигунів внутрішнього згоряння. *Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ, квітень 2020. Одеса: ОНМУ*, 2020. С. 151–155. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19286.40006 (дата звернення: 28.05.2025).

3. Current status and applications for hydraulic pump fault diagnosis: A review / Y. Yang et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 24. Article 9714. URL: https://doi.org/10.3390/s22249714 (дата звернення: 28.05.2025).

4. Investigation of failure causes of oil pump based on operating conditions / J.-J. Lee et al. *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13(7). 4308. URL: https://doi.org/10.3390/app13074308 (дата звернення: 28.05.2025).

5. Cabuk A. Experimental IoT study on fault detection and preventive apparatus using Node-RED ship's main engine cooling water pump motor. *Engineering Failure Analysis.* 2022. Vol. 138. Article 106310. URL: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106310 (дата звернення: 28.05.2025).

6. Тараненко С., Голубєва С. Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу суднових електродвигунів. *Транспортні системи і технології.* 2022. № 40. С. 149–158. URL: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-137 (дата звернення: 28.05.2025).

7. Тараненко С., Голубєва С. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2021. № 2 (33). С. 5–12. URL: https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/165/129 (дата звернення: 27.05.2025).

8. Dionysiou K., Bolbo, V., Theotokatos G. A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. *Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2022. Vol. 236, No. 1. P. 228–244. URL: https://doi.org/10.1177/14750902211004204 (дата звернення: 28.05.2025).

9. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-intensive technologies*. 2023. Vol. 3, No. 59. P. 251–261. URL: https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946 (дата звернення: 28.05.2025).

10. Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems / X. Xu et al. *Transportation Safety and Environment.* 2021. Vol. 3 (2). P. 85–102. URL: https://doi.org/10.1093/tse/tdab005 (дата звернення: 28.05.2025).

11. Ship diesel engine fault diagnosis using data science and machine learning / M. Pająk et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12, No. 18. Article 3860. URL: https://doi.org/10.3390/electronics12183860 (дата звернення: 28.05.2025).

12. Girtler J., Rudnicki J. Quantumness in diagnostics of marine internal combustion engines and other ship power plant machines. *Polish Maritime Research.* 2023. Vol. 30, No. 4. P. 110–119. URL: https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0064 (дата звернення: 28.05.2025).

13. Adamkiewicz A., Nikończuk P. An attempt at applying machine learning in diagnosing marine ship engine turbochargers. *Eksploatacja i Niezawodność.* 2022. Vol. 24, No. 4. P. 795–804. URL: http://doi.org/10.17531/ein.2022.4.19 (дата звернення: 28.05.2025).

14. Кононенко А., Слабко В. Реалізація неперервної освіти в процесі формування професійної компетентності майбутніх суднових механіків. Науковий часопис. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи. 2024. № 101. С. 20–25. URL: https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 (дата звернення: 28.05.2025).

15. Чимшир В. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту : колективна монографія. Ізмаїл: ДІ НУ «ОМА», 2020. 472 с. URL: https://surli.cc/zjxuxc (дата звернення: 28.05.2025).

Kholdenko V.I. METHODS FOR ASSESSING THE CONDITION OF SHIP PUMPS BASED ON VIBRATION AND ACOUSTIC DIAGNOSTICS DURING OPERATION

Ensuring the uninterrupted and reliable operation of ship pumps is a key factor in the effective operation of ship power plants. This problem is particularly relevant in modern requirements for automation of technical maintenance, energy efficiency and reduction of costs for repair of ship equipment. The study aims to determine the most informative physical parameters and substantiate effective methods of their analysis for assessing the condition of ship pumps in real operation.

The paper analyzes the specifics of the formation of vibration and acoustic signals in the event of damage such as imbalance, bearing wear, cavitation, loosening of fasteners, etc. Spectral signs of defects are identified, particularly amplitudes at 1X–3X harmonics, broadband impulse disturbances and changes in the nature of noise in the range of 4–12 kHz. A critical review of modern data collection tools (*accelerometers, hydrophones*)*, sensor mounting methods, and signal processing tools is carried out: fast Fourier transform* (*FFT*)*, envelope analysis, wavelet decomposition, correlation analysis. Generalized characteristics of each method are given in terms of suitability for marine operating conditions and typical damages.*

Particular attention is paid to the prospects for using intelligent algorithms, particularly neural networks and hybrid models, which provide high accuracy in classifying the technical condition of units. Directions for improving diagnostic systems are proposed: introduction of new generation sensors with increased sensitivity, automation of the signal analysis and interpretation process, integration of systems into on-board equipment, taking into account the specifics of the marine environment. Practical recommendations are summarized for adapting methods to ship conditions and training technical personnel to work with diagnostic platforms.

The study results have practical significance for designing technical monitoring systems, improving the procedures for technical maintenance of ship mechanisms and increasing the efficiency of fleet technical condition management. The conclusions obtained will contribute to forming a unified approach to assessing the condition of pumping equipment, considering multisensor data, adaptive algorithms and marine operating conditions.

Key words: *technical diagnostics, ship equipment, spectral analysis, vibration, acoustic noise, neural networks, sensor systems.*

ПРИЛАДИ

УДК 617.75.089.28:004.451.7.032.41 (045)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/04

Барановський Д.М.
Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Кучеренко В.Л.
Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ВИКОРИСТАННЯ ПРИКЛАДНИХ І ГРАДІЄНТНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ БЛОКУ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ СІМЕЙНОГО ЛІКАРЯ

У статті досліджується роль систем підтримки прийняття рішень (СППР) у підвищенні ефективності роботи сімейних лікарів України з акцентом на інтеграцію прикладних і градієнтних методів оптимізації. Особлива увага приділяється розробці блоку прогнозування відмов медичного обладнання, який використовує методи машинного навчання, зокрема градієнтні методи для навчання нейронних мереж, для забезпечення надійності техніки та оптимізації ресурсів. Проаналізовано вплив інформаційних технологій, таких як eHealth, на прискорення діагностичних процесів і підвищення якості первинної медичної допомоги. Запропоновано теоретичну основу для вдосконалення СППР та їх практичного впровадження в медичну практику. Особливу увагу буде приділено інтеграції СППР у eHealth та вдосконалення СППР додаванням блоку прогнозування відмов медичного обладнання, що зменшить кількість можливих відмов та дозволить зробити процес усунення відмови до її настання більш швидким.

У статті розглядається інтеграція СППР із блоком прогнозування відмов медичного обладнання. Описано, як аналіз прогнозних даних дозволяє системі формувати обґрунтовані рекомендації щодо технічного обслуговування для забезпечення безперебійної та безпечної роботи медичних виробів. Досліджується процес навчання штучних нейронних мереж для прогнозування відмов медичного обладнання. Розглянуто підходи до обробки експлуатаційних даних, вибору архітектури моделей та підвищення точності прогнозування з метою забезпечення надійності і безпеки медичних технологій.

Ключові слова: *сімейна медицина, градієнтні методи оптимізації, системи підтримки прийняття рішень, прогнозування відмов медичного обладнання, точність діагностування, якість медичної допомоги, ймовірність помилок, ризики, штучні нейронні мережі, машинне навчання, інформаційні технології, eHealth, багатовимірна нелінійна оптимізація.*

Постановка проблеми. Сімейні лікарі є основою системи первинної медичної допомоги в Україні. Саме вони налагоджують перший контакт між пацієнтом та медичною системою та відповідають за профілактику, діагностику, лікування та координацію медичної допомоги. Їхня роль у підтримці здоров'я населення незамінна. Щоденна практика сімейного лікаря пов'язана з необхідністю прийняття складних рішень у ситуаціях, коли доступна інформація може бути обмеженою, а клінічні випадки – очевидними, сумнівними чи діагностично складними. Точність діагностування є одним із найважливіших аспектів роботи сімейного лікаря, адже від неї залежить правильність вибору лікувальних методів і, зрештою, результат терапії. Помилки на етапі діагностування можуть призвести до серйозних наслідків, таких як неправильне лікування, погіршення стану пацієнта чи навіть летальні випадки. У цьому контексті сучасні інформаційні технології стають важливим інструментом, що дозволяє значно прискорити процес постановки попереднього діагнозу та підвищити його точність. Проте, незважаючи на прогрес у впровадженні інформаційних систем, таких як eHealth, залишаються актуальними

питання підвищення ефективності роботи сімейних лікарів. Зокрема, це стосується постановки заключного діагнозу відповідно до Міжнародного класифікатора хвороб (МКХ-10) та нормативних документів Міністерства охорони здоров'я України (МОЗ), оптимального вибору лікувальних методів, а також забезпечення високої якості обслуговування в умовах ресурсних обмежень [1]. СППР відкривають нові можливості для вирішення цих проблем, а їхня оптимізація за допомогою прикладних методів, таких як градієнтні методи навчання нейронних мереж, може значно підвищити ефективність медичної практики.

Метою статті є детальне дослідження можливостей оптимізації систем підтримки прийняття рішень для сімейних лікарів України. Ми прагнемо продемонструвати, як застосування прикладних методів оптимізації, зокрема градієнтних методів для навчання штучних нейронних мереж, може покращити якість медичної допомоги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи підтримки прийняття рішень (СППР) є визнаним інструментом у медичній галузі, який активно досліджується як у вітчизняній, так і в зарубіжній науковій літературі. Питання медичного діагностування та системного аналізу розглядаються в роботах Н.В. Білак [2], де підкреслюється важливість структурованого підходу до прийняття рішень у складних клінічних ситуаціях. Переваги використання інформаційних технологій, зокрема роботи з центральною базою даних E-Health та медичними інформаційними системами, висвітлені в працях Є.Б. Радзішевської та О.В. Висоцької [3]. Ці дослідження демонструють, як інтеграція цифрових інструментів може оптимізувати процеси в охороні здоров'я. В наукових роботах [4] проаналізовано клінічні системи підтримки прийняття рішень, акцентуючи увагу на їхніх перевагах (підвищення точності діагностування, зменшення ймовірності помилок), ризиках (технічні збої, недостатня підготовка персоналу) та стратегіях успішного впровадження. У роботі «Розробка системи підтримки прийняття рішень сімейного лікаря на засадах системного аналізу» [1] запропоновано оптимізовану модель СППР для сімейних лікарів, яка базується на системному аналізі та враховує особливості української медичної практики. Окрім цього, в науковій літературі активно досліджуються методи оптимізації, які можна застосовувати в медичних системах. Зокрема, градієнтні методи для навчання штучних нейронних мереж є популярним інструментом у задачах багатовимірної нелінійної оптимізації, що має пряме відношення до вдосконалення СППР. Такі підходи дозволяють обробляти великі обсяги даних і знаходити оптимальні рішення в умовах невизначеності, що є критично важливим для медичної діагностики [5].

Стаття спрямована на створення теоретичної бази для розробки блоку прогнозування відмов, подальшого вдосконалення СППР та їх впровадження в медичну практику.

Постановка завдання. Система підтримки прийняття рішень – це програмно-апаратний комплекс, який допомагає сімейним лікарям у процесі аналізу даних, постановки діагнозу та вибору лікувальних стратегій [1]. СППР складається з кількох ключових компонентів: база знань, що містить медичну інформацію, протоколи лікування та стандарти (наприклад, МКХ-10); алгоритми обробки даних, які аналізують введену інформацію (симптоми, результати обстежень); інтерфейс користувача, що забезпечує зручну взаємодію лікаря з системою та іншими медичними інформаційними системами (МІС); модуль рекомендацій, який пропонує можливі діагностичні та терапевтичні рішення.

Виклад основного матеріалу. У роботі [1] описано СППР, розроблену спеціально для сімейних лікарів України.

Ця система враховує локальні особливості медичної практики, такі як нормативні вимоги МОЗ, доступність ресурсів та типові клінічні сценарії. Вона дозволяє автоматизувати рутинні процеси, зменшувати суб'єктивний фактор у прийнятті рішень і надавати лікарям обґрунтовані рекомендації на основі аналізу даних. Для підвищення ефективності та надійності СППР для сімейних лікарів до її структури можна додати блок прогнозування відмов. Цей блок призначений для аналізу стану медичного обладнання, прогнозування можливих збоїв і забезпечення своєчасного реагування на потенційні проблеми. Цей блок інтегрується в СППР наступним чином (рис. 2).

Після додавання блоку прогнозування відмов структура СППР включає такі основні компоненти: базу знань (містить медичну інформацію, протоколи лікування та стандарти), алгоритми обробки даних (аналізують введену інформацію симптоми, результати обстежень для підтримки діагностики та рекомендацій), інтерфейс користувача (забезпечує зручну взаємодію лікаря

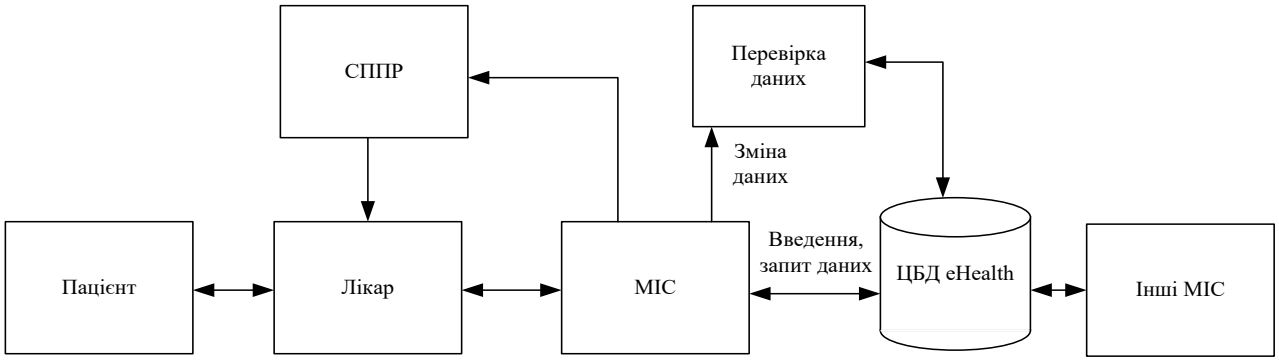


Рис. 1. Структурна схема інтеграції СППР в eHealth [1]

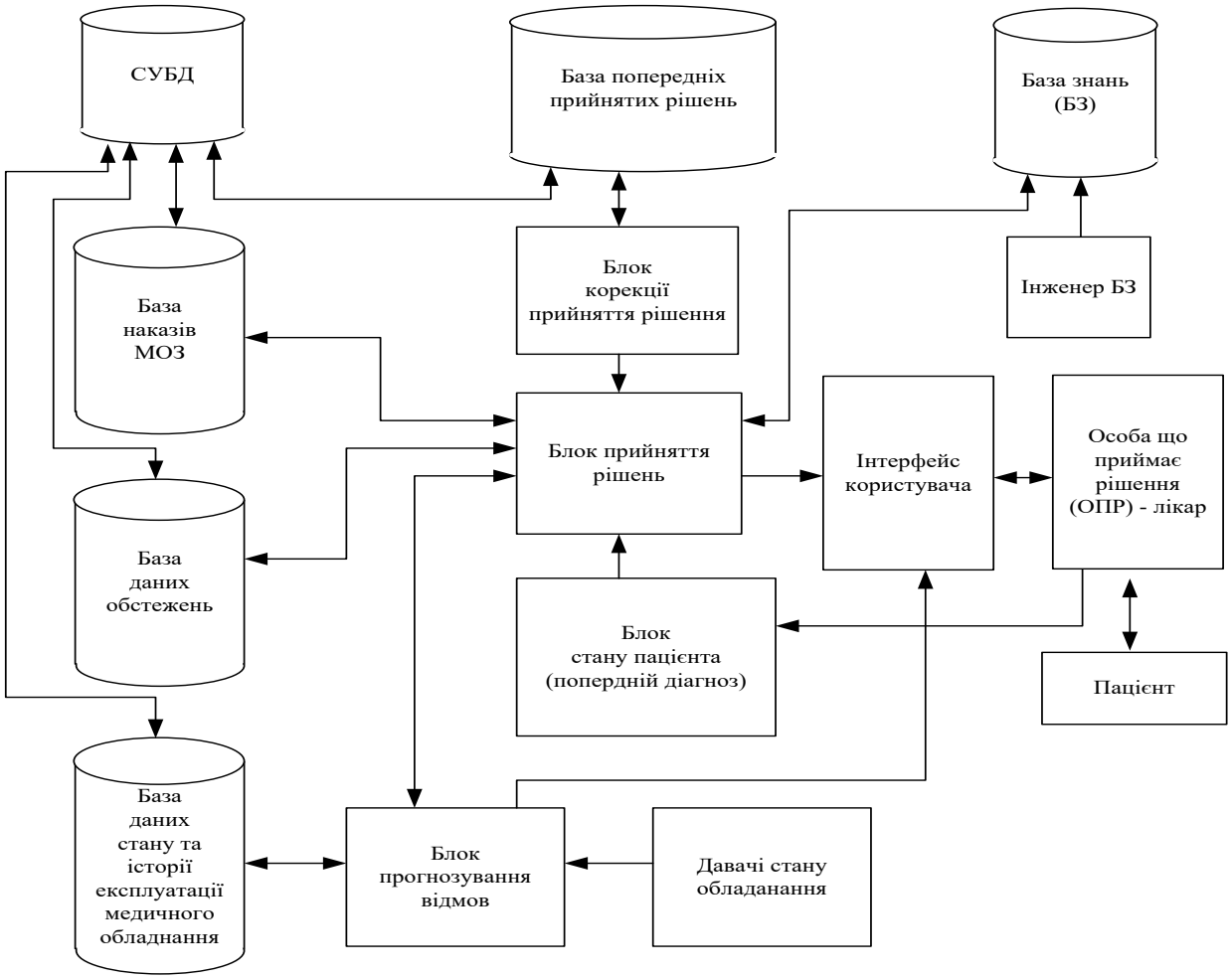


Рис. 2. Структурна схема СППР із блоком прогнозування відмов

з системою через відображення даних, рекомендацій і попереджень та сповіщень від блоку прогнозування відмов), блок прийняття рішень (пропонує можливі діагностичні та терапевтичні рішення на основі оброблених даних, враховує інформацію про стан обладнання від блоку прогнозування для коректного планування процедур, блок прогнозування відмов (аналізує дані про стан медичного обладнання знос, історія експлуатації, поточні показники, прогнозує ймовірність відмов і видає попередження для лікарів та технічного персоналу, допомагає планувати профілактичні заходи (технічне обслуговування) та оптимізувати ресурси.

Блок прогнозування відмов додає в СППР нові можливості, спрямовані на забезпечення надійності медичного обладнання, яке використовується в первинній медичній допомозі. Прогнозування можливих відмов на основі

історичних даних і поточних показників стану обладнання (наприклад, зносу деталей, часу роботи) блок визначає ймовірність майбутніх збоїв. Попередження про потенційні проблеми – автоматично сповіщає лікарів і технічний персонал про ризик відмови, дозволяючи вчасно провести обслуговування чи заміну. Оптимізація розподілу ресурсів допомагає планувати профілактичні заходи, закупівлю запасних частин і залучення технічного персоналу, зменшуючи витрати на екстрені ремонти.

Інтеграція блоку прогнозування відмов у СППР відбувається наступним чином. Блок передає дані про стан обладнання в інтерфейс користувача для відображення попереджень. Інформація про прогнозовані відмови може впливати на рекомендації модуля, наприклад, пропонуючи відкласти процедуру до усунення проблеми з обладнанням. Технологічна реалізація: методи машинного навчання аналізують дані про обладнання для точного прогнозування відмов; інтеграція з моніторингом для отримання блоком інформації в реальному часі від сенсорів і діагностичних систем, підключених до обладнання; оптимізація розподілу ресурсів на основі прогнозів; оновлення інтерфейсу – у СППР додається розділ із повідомленнями про стан обладнання та рекомендаціями щодо дій (наприклад, «Перевірте апарат УЗД до 15.10.2025»). Інтеграція блоку прогнозування відмов у СППР підвищить надійність медичного обладнання, знизивши ризик збоїв під час критичних процедур, забезпечує безперебійну роботу системи та впевненість лікарів у справності техніки, що сприяє якіснішій медичній допомозі. Водночас це оптимізує витрати завдяки своєчасному виявленню проблем, запобігаючи дорогим ремонтам і простоям, а також автоматизує контроль стану обладнання, звільняючи персонал від рутинного моніторингу.

Основною перевагою СППР є її здатність інтегрувати різноманітні джерела інформації – від електронних медичних карток до результатів лабораторних досліджень – і надавати цілісну картину стану пацієнта. Однак для максимальної ефективності такої системи необхідно її вдосконалювати, застосовуючи сучасні методи оптимізації.

Оптимізація СППР для сімейних лікарів може бути реалізована на кількох ключових етапах їхньої роботи:

1. Розподіл ресурсів. Ефективне використання часу, обладнання та персоналу є критичним у первинній медичній допомозі, де ресурси часто обмежені. Методи оптимізації дозволяють розподіляти ці ресурси таким чином, щоб забезпечити максимальну якість обслуговування з мінімальними затратами [5]. Наприклад, СППР може визначати пріоритетність обстежень для різних груп пацієнтів, враховуючи їхній стан і доступність обладнання.

2. Розробка протоколів лікування. Оптимізація допомагає створювати стандартизовані протоколи лікування, які враховують як загальні рекомендації, так і індивідуальні особливості пацієнтів. Це сприяє підвищенню ефективності терапії та зниженню ймовірності помилок.

3. Планування обстежень і лабораторних досліджень. Методи оптимізації дозволяють визначати оптимальний час і послідовність проведення діагностичних процедур, що забезпечує максимальну інформативність з мінімальними витратами часу та ресурсів.

4. Вибір лікувальних методів. Найбільш критичним етапом є вибір оптимального лікування для конкретного пацієнта. Тут методи оптимізації, зокрема градієнтні методи для навчання штучних нейронних мереж, відіграють ключову роль.

Навчання штучних нейронних мереж (НМ) полягає у знаходженні таких параметрів мережі (ваг і зміщень), які дозволяють їй найкраще виконувати поставлене завдання – наприклад, прогнозувати кількість відмов обладнання. Цей процес зводиться до задачі багатовимірної нелінійної оптимізації, де мета – мінімізувати цільову функцію, таку як середня квадратична похибка.

Розглянемо формальний опис задачі:

Нехай задано функцію

$$y = f\left(w, x\right),$$

де w – вектор параметрів мережі; x – вектор вхідних даних (історія експлуатації, поточний стан обладнання); y – вихідні дані (ймовірність відмови).

Маємо набір відомих реалізацій y^* при заданих x. Завдання – знайти w, при якому різниця між y та y^* буде мінімальною. Для цього мінімізується цільова функція:

$$F\left(w\right) = \frac{1}{k}\sum_{m=1}^{k} Q\left(\varepsilon\left(w, m\right)\right),$$

де k – кількість ітерацій;

$\varepsilon\left(w, m\right) = y\left(w, x^{(m)}\right) - y^{*(m)}$ – вектор помилки;

$Q\left(\varepsilon\left(w, m\right)\right) = \varepsilon^{\top}\left(w, m\right) R \varepsilon\left(w, m\right)$ – миттєвий критерій якості;

R – додатно визначена матриця.

Градієнтні методи, такі як градієнтний спуск, оновлюють параметри w у напрямку найбільшого зменшення $F(w)$. Базовий алгоритм градієнтного спуску має вигляд:

$$w_{t+1} = w_t - \eta \nabla F\left(w_t\right)$$

де η – швидкість навчання, а $\nabla F\left(w_t\right)$ – градієнт функції втрат.

Цей підхід дозволяє поступово наближати параметри w до таких значень, які мінімізують середню зважену помилку моделі. Проте класичний градієнтний спуск може бути повільним для складних мереж. Тому застосовуються його модифікації (пришвидшений градієнт Нестерова, Adam, RMSprop і Adagrad) [6]. У медичних задачах кількість параметрів w може сягати мільйонів чи навіть мільярдів, залежно від архітектури мережі. Це робить градієнтні методи незамінними для обробки великих масивів даних, таких як параметри стану медичного обладнання та прогнозування його відмов.

Принцип роботи блоку прогнозування відмов.

Блок прогнозування відмов у СППР – це інтелектуальний модуль, призначений для оцінки стану медичного обладнання, прогнозування його можливих збоїв та запобігання раптовим поломкам. Він базується на сучасних технологіях аналізу даних, машинного навчання та сенсорних систем, щоб забезпечити безперебійну роботу техніки, яка використовується в первинній медичній допомозі. Першим етапом роботи блоку є збір даних про поточний стан обладнання та історію його експлуатації, що стане основою для подальшого аналізу та прогнозування. Під час обробки зібраних даних виявляються закономірності, які можуть сигналізувати про потенційні відмови. Аналіз даних відбувається методами статистичного аналізу, машинного навчання (штучних нейронних мереж), порогових значень. Моделі машинного навчання навчаються на історичних даних, котрі потім застосовуються до поточних показників для прогнозування. На основі оброблених даних блок генерує прогнози щодо ймовірності та часу можливих збоїв. Регресійна модель аналізує тренди (наприклад, поступове зростання температури) і екстраполює їх у майбутнє. Нейронна мережа враховує комбінацію факторів (наприклад, температура + знос + частота використання) для точнішого прогнозу. Прогноз оновлюється в реальному часі при надходженні нових даних із сенсорів. Блок не лише прогнозує, але й активно інформує користувачів про потенційні проблеми та пропонує рішення. Блок не працює ізольовано – він тісно пов'язаний з іншими модулями СППР (рис. 2). Взаємодія відбувається таким чином: якщо обладнання ненадійне, СППР може змінити рекомендації для лікарів (наприклад, перенести процедуру на інший апарат). Дані про відмови та ремонти оновлюють базу даних, покращуючи моделі прогнозування. Блок коригує прогнози, враховуючи нові дані. Блок допомагає ефективно використовувати ресурси медзакладу. Персонал планує роботу техніків так, щоб уникнути перевантажень. Попередження раптових збоїв зменшує витрати на термінові ремонти. Блок прогнозує, що через 2 місяці 3 апарати потребуватимуть заміни фільтрів, і рекомендує закупити їх заздалегідь. Для реалізації блоку прогнозування відмов у системі підтримки прийняття рішень (СППР) медичного обладнання необхідно виконати кілька етапів від збору даних до інтеграції з системою. Алгоритм роботи блоку прогнозування відмов зображено на рисунку 3.

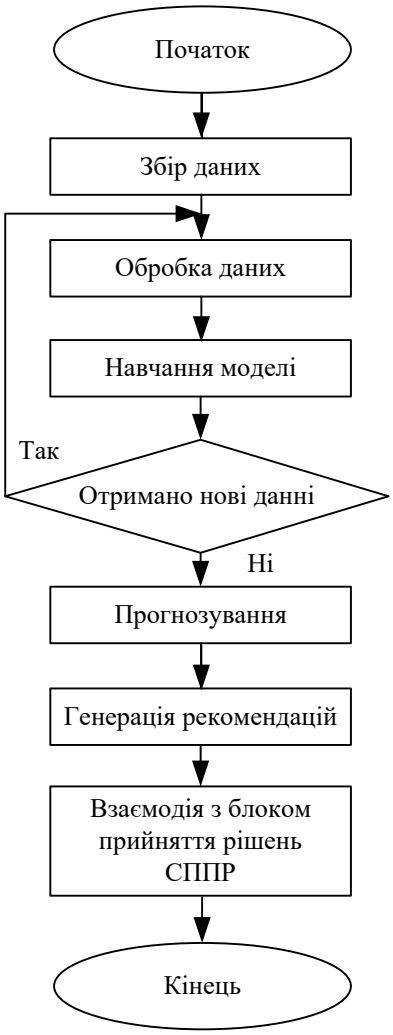


Рис. 3. Алгоритм блоку прогнозування відмов

На першому етапі відбувається збір наступних даних: історичні дані про відмови обладнання, поточні показники з сенсорів (температура, вібрація, знос), експлуатаційні параметри (кількість процедур, час роботи). Інформація надходить як у ручному режимі техніками, так і в автоматичному за допомогою IoT-сенсорів або інтеграції з системою управління обладнанням. Обробка даних включає очищення від аномалій та нереалістичних значень, нормалізацію даних, структурування, перетворення та зберігання інформації в зручний для навчання моделі формат. Далі відбувається навчання моделі, та її тренування з використанням історичних даних про відмови.

Перед створенням прогнозу відбувається перевірка надходження нових відомостей для навчання моделі. Якщо отримано нові данні, відбувається повторне навчання. У разі, коли оновлення інформації відсутнє, запускається процес створення прогнозу. Модель прогнозує час до відмови або ймовірність відмови. Далі відбувається генерація рекомендацій, порівняння отриманого прогнозу з встановленими критичними значеннями. Якщо прогноз перевищує поріг, видається попередження. Наприклад, «Замініть деталь» або «Проведіть діагностику». В блок прийняття рішень надходять результати прогнозів відмов, а рекомендації виводяться напряму в інтерфейс користувача.

Висновки. Системи підтримки прийняття рішень, оптимізовані за допомогою прикладних методів, зокрема градієнтних методів для навчання нейронних мереж, мають потенціал значно покращити роботу сімейних лікарів. Штучний інтелект уже сьогодні трансформує медицину, надаючи нові можливості для діагностування, персоналізованого лікування та досліджень. Додавання блоку прогнозування відмов у структуру СППР для сімейних лікарів значно підвищує надійність медичного обладнання та ефективність роботи системи. Цей компонент не лише забезпечує безперебійну роботу техніки, а й оптимізує ресурси, що сприяє якіснішій і безпечнішій медичній допомозі для пацієнтів. Рекомендуємо подальші дослідження у напрямку вдосконалення СППР, зокрема з акцентом на практичне впровадження ШІ у систему первинної медичної допомоги України.

Список літератури:

1. Барановський Д. М. Розробка системи підтримки прийняття рішень сімейного лікаря на засадах системного аналізу. Технічна інженерія. 2023. № 2 (92). С. 89–95.

2. Білак Н. В. Основи системного аналізу та прийняття рішення: конспект лекцій / Н. В. Білак. Київ : НАУ, 2023. 81 с.

3. Радзішевська Є. Б. Інформаційні технології в медицині E-Health : підручник / Є. Б. Радзішевська, О. В. Висоцька. Харків : ХНМУ, 2019. 73 с.

4. Sutton R. T. An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success / R. T. Sutton, D. Pincock, D. C. Baumgart, D. C. Sadowski, R. N. Fedorak, K. I. Kroeker / npj Digital Medicine [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://www.nature.com/articles/s41746-020-0221-y

5. Барановський Д. М. Застосування прикладних методів оптимізації при розробці системи підтримки прийняття рішень сімейного лікаря, The 10 th International scientific and practical conference “Innovative development of science, technology and education”(August 29–31, 2024) Perfect Publishing, Toronto, Canada. 2024. 367 p.

6. O. G. Avrunin, E. V. Mustetsova, N. I. Zabolotna, D. M. Baranovskiy, A. M. Dyvak, Possibilities of apnea diagnostics by fuzzy logic methods, Information technology in medical diagnostics II, p. 39–47, 2018.

Baranovskyi D.M., Kucherenko V.L. USE OF APPLIED AND GRADIENT OPTIMIZATION METHODS FOR DEVELOPMENT OF A FAILURE PREDICTION BLOCK IN A FAMILY DOCTOR’S DECISION SUPPORT SYSTEM

The article explores the role of decision support systems (*DSS*) *in increasing the efficiency of family doctors in Ukraine with an emphasis on the integration of applied and gradient optimization methods. Special attention is paid to the development of a medical equipment failure prediction block that uses machine learning methods, in particular gradient methods for training neural networks, to ensure the reliability of equipment and optimize resources. The impact of information technologies, such as eHealth, on accelerating diagnostic processes and improving the quality of primary health care is analyzed. A theoretical basis for improving DSS and their practical implementation in medical practice is proposed. Special attention will be paid to the integration of DSS into eHealth and improving DSS by adding a medical equipment failure prediction block, which will reduce the number of possible failures and make the process of eliminating failure before it occurs faster.*

The article considers the integration of DSS with a medical equipment failure prediction block. It describes how predictive data analysis allows the system to generate informed maintenance recommendations to ensure the smooth and safe operation of medical devices. The process of training artificial neural networks to predict medical equipment failures is investigated. Approaches to processing operational data, choosing model architectures, and improving prediction accuracy are considered to ensure the reliability and safety of medical technologies.

Key words: *family medicine, gradient optimization methods, decision support systems, prediction of medical equipment failures, diagnostic accuracy, quality of medical care, probability of errors, risks, artificial neural networks, machine learning, information technology, eHealth, multidimensional nonlinear optimization.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.622: 517.927
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/05

Бараннік В.В.
Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОДОЛОГІЧНА БАЗА ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ НЕРІВНОВАЖНОГО ПОЗИЦІЙНОГО КОДУВАННЯ ВІДЕОДАНИХ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

В статті обґрунтовано, що важливим напрямком для підвищення якості надання відеоінформаційної продукції є удосконалення технологій та методів стиснення відеоданих. На даний час розроблено деяка кількість методів стиснення відеоданих. Доведено, що для переважної кількості найбільш апробованих на практиці методів властивий характерний недолік. Такий недолік стосується того, що досягнення практично-потрібних показників стиснення забезпечується лише за умов втрати візуальної якості (цілісності) відеоданих. Показано, що таке зумовлено занадто критичним усуненням кількості психовізуальної надлишковості. В статті стверджено, що можливі напрямки стосовно: розробки методів з можливістю змінювати параметри моделі врахування психовізуальних особливостей; вдосконалення технології усунення надмірності на основі встановлення структурно-позиційних особливостей відеоданих. Показано, що першій варіант має певні обмеження у разі обробки насичених відеозображень аеромоніторингу. Отже стверджено, що важливим є розвиток другого напрямку вдосконалення методів стиснення. Обґрунтовано, що технологічним рішенням для структурного підходу щодо реалізації процесів стиснення відеоданих є методи нерівноважного позиційного (НРП) кодування. Доведено, що для методів такого класу притаманні певні недоліки, а саме стосовно впливу основ молодших елементів НРП-чисел на процес формування ваги старших елементів. Доведено, що вага старших елементів є визначальною щодо довжини кодового опису. Звідси обґрунтовано подальше вдосконалення методів структурного класу полягає у розробці напрямків усунення недоліків технологій НРП-кодування. В статті викладено розробку методології модифікації нерівноважної позиційної системи, яка базується на таких аспектах: формувати двовимірний нерівноважний позиційний базис на основі одночасного врахування структурних закономірностей за двома напрямками; створення адаптивної двонаправленої лексикографії з врахуванням локальних структурно-статистичних закономірностей масивів, що обробляються шляхом аналізу величини відхилення значень елементу та відповідної основи на попередньому кроці процесу реверсного кодування.

Ключові слова: *інфокомунікації, безпілотні платформи, відеодані, стиснення, нерівноважне кодування.*

Постановка проблеми. Розвиток прикладних застосувань в галузі інформаційних технологій, штучного інтелекту потребує постійного розвитку сервісів надання відеоінформаційної продукції (послуг). В сучасних умовах найбільш затребуваними є застосування, які стосуються використання безпілотних платформ (БП) в автономному та змішаних режимах управління [1, с. 4]. Висуваються критичні вимоги щодо характеристик якості надання відеоінформації для: управління БП; збору та доведення інформації в процесі моніторингу [2, с. 3]. Критичність таки вимог зумовлено наявністю дисбалансу між швидкістю передачі даних в ІКС з одного боку, та рівнем інформаційного навантаження ІКС з іншого боку [3, с. 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Можливими шляхами для підвищення якості надання відеоінформаційної продукції з використанням БП є удосконалення технологій та методів стиснення відеоданих [4, с. 3; 5, с. 4]. Водночас для переважної кількості найбільш апробованих на практиці методів властивий характерний недолік. Він стосується того, що досягнення практично-потрібних показників стиснення забезпечується лише за умов

втрати візуальної якості (цілісності) відеоданих [6, с. 3; 7, с. 5]. Тут можливі такі напрямки вдосконалення [8, с. 2; 9, с. 3]: розробляти методи з можливістю змінювати параметри моделі врахування психовізуальних особливостей в залежності від контенту локальних ділянок відеоданих; вдосконалювати технології усунення надмірності на основі встановлення структурно-позиційних особливостей контенту відеоданих.

В загальному випадку потрібно вдосконалювати обидва варіанти. Першому варіанту надається певна увага в роботах [10, с. 4]. Водночас такий варіант має певні обмеження у разі обробки насичених відеозображень аеромоніторингу. Отже важливим є розвиток другого напрямку вдосконалення методів стиснення. Звідси актуальною ***науково-прикладною задачею***, є вдосконалення технологій стиснення на основі структурно-позиційного кодування.

Постановка завдання. Базовим технологічним рішенням для структурного підходу щодо реалізації процесів стиснення відеоданих є методи нерівноважного позиційного (НРП) кодування [11, с. 3]. Методи НРП-кодування мають певну ефективність для збільшення рівня стиснення в умовах виключення втрат інформації. Водночас для методів такого класу притаманні певні недоліки. Вони стосуються впливу основ молодших елементів НРП-чисел на процес формування ваги старших елементів [12, с. 4]. Саме вага старших елементів є визначальною щодо довжини кодового опису. Звідси подальше вдосконалення методів структурного класу полягає у розробці напрямків усунення недоліків технологій НРП-кодування.

Таким чином ***мета досліджень статті*** стосується розробці методологічної бази щодо вдосконалення системи нерівноважного позиційного кодування відеоданих в інфокомунікаційних системах.

Виклад основного матеріалу. Для правил кодування позиційних чисел існують певні *системні недоліки*, а саме такі, що стосуються наступного:

1. Перший системний недолік, що характерний для систем нерівноважного позиційного (НРП) кодування, породжується *негнучкістю* встановленого правилу лексикографії. Зазвичай при цьому потрібно враховувати напрямок розподілу вагових коефіцієнтів за елементами ПЧ, а саме: прямий або зворотній (реверсний); в напрямку старших або молодших елементів ПЧ.

В таких ситуаціях посилюється вплив ваги елементів, значення яких є найбільшими у НРПЧ. Тоді кодове значення E_j буде наближатися до максимально допустимого, величина якого визначається як накоплене множення основ g_τ в межах встановленої системи G основ.

З іншого боку для заданої системи основ G кодове значення E_j для реверсного кодування в режимі розподілу вагових коефіцієнтів за старшими елементами НВПЧ теж буде наближатися до величини $(\prod_{i=1}^{m} g_i - 1)$. Тому знижується перевага реверсного кодування в режимі розподілу вагових коефіцієнтів за молодшими елементами.

Створення методологічної бази для вдосконалення (модифікації) системи нерівновагового позиційного кодування. Подальший розвиток систем нерівновагового позиційного кодування необхідно здійснювати в напрямку зменшення кількості залишкової надмірності, як на рівні формування кодових значень, так й на рівні побудови відповідних кодограм в умовах виключення додаткового використання службових відомостей. В цьому випадку забезпечується:

– по-перше скорочення кількості біт, які витрачаються на кодограми кодових значень нерівновагових позиційних чисел;

– по-друге фіксується кількість бітових затрат на кодове представлення службової інформації.

Отже в напрямку усунення виявлених недоліків систем кодування НРПЧ *пропонується* наступне.

1. Перший аспект методології розробляється для усунення дисбалансу в процесі побудови системи основ в НРП-базисі, який утворюється тим, що динамічні діапазони окремих елементів формуються в межах всього масиву без врахування його локальних особливостей. Тобто система основ будується з врахуванням глобальних (загальних) особливостей масиву (трансформанти, відеосегменту).

Пропонується формувати двовимірний нерівноваговий позиційний базис (ДНРБ). Тут основи $g_{i,j}$ елементів $a_{i,j}$ формуються як мінімальні значення з двох динамічних діапазонів g_i, g_j по i-му рядку та j-му стовбцю, тобто:

$$g_{i,j} = \min(g_i; g_j) = \min(\max_{1\le j\le n}\{a_{i,j}\}; \max_{1\le i\le m}\{a_{i,j}\}).$$

В цьому виразі величини m та n позначають кількість відповідно рядків та стовбців.

Встановлення системи основ з одночасним врахуванням інформації про структурні

особливості в рядках та стовбцях трансформанти відносно визначення основ або тільки за діапазоном рядка чи тільки за діапазоном стовбцю дозволяє виявляти структурні обмеження на динамічні діапазоні окремих компонент більш адаптивне до особливостей трансформант ДКП. Звідки створюються умови для скорочення кількості $\Delta R(E)_j$ залишкової надмірності на рівні формування кодових значень нерівновагових позиційних чисел (НРПЧ).

2. Другий аспект методології розробляється для створення умов, в яких забезпечується перевага реверсного кодування НРП чисел в режимі розподілу вагових коефіцієнтів за молодшими елементами відносно режиму розподілу ваги за старшими елементами.

В цьому напрямку пропонується створити *модифікацію НРП-систем щодо удосконалення правила лексикографії.*

Тут можливі наступні підходи.

2.1. Перший підхід щодо модифікації полягає у використанні ***зворотної однонаправленої*** лексикографії.

У разі ***зворотної*** лексикографії в умовах збереження старшинства за першими елементами позиційних чисел (тобто чим старше елемент то відповідно він матиме найбільшу вагу) правило буде описуватися наступним чином. Порядок індексування в робочому діапазону визначається відносно максимального рівня. З двох позиційних чисел A'_j та A'_u старшим є те число, у якого старший елемент має більше значення. Отже, якщо для елементів з індексами $i=\overline{1,\tau-1}$ виконується рівняння, тобто: $a'_{i,j}=a'_{i,u}$, а для елементів $a'_{\tau,j}$ и $a'_{\tau,u}$ навпаки виконується нерівність, а саме: $a'_{\tau,j}<a'_{\tau,u}$, то індекс E'_j позиційного числа A'_j в допустимої множині у разі ***зворотної*** лексикографії буде більшим, ніж індекс E'_u числа A'_u, тобто: $E'_j > E'_u$.

В цьому випадку в допустимої позиційної множині число A'_u буде молодшим відносно числа A'_j, тобто A'_u передує послідовності A'_j.

Наприклад, Припустимо, що основа для τ-го елементу ПЧ дорівнюватиме $g_\tau=17$. Тоді з двох позиційних чисел $A'_j=\{1;\ 3;\ a'_{\tau,j}=g_\tau-a_{\tau,j}=12;\ a'_{\tau+1,j};\ ...;\ a'_{m,j}\}$ та $A'_u=\{1;\ 3;a'_{\tau,u}=g_\tau-a_{\tau,u}=2;\ a'_{\tau+1,u};\ ...;\ a'_{m,u}\}$, у разі зворотної лексикографії менший індекс буде мати число A'_u, тобто $a_{\tau,j}=5<a_{\tau,u}=13$ але $E'_j > E'_u$.

Однак в цьому випадку навпаки можуть виникати ситуації, коли різниця між значеннями основи g_τ та відповідного елементу $a_{\tau,j}$ НРПЧ буде зростати, тобто:

будуть формуватися такі основи g_τ, значення яких є занадто збільшеними щодо значень $a_{\tau,j}$ відповідних елементів НРПЧ, тобто:

$$a'_{\tau,j}=g_{\tau,j}-a_{\tau,j}\to g_{\tau,j}-1 \qquad (1)$$

Приклад індексації значень $a_{\tau,j}$ елементів НРПЧ в τ-му робочому діапазоні за зворотнім правилом лексикографії так, що виконується умова (1), наведено на рис. 1.

Така ситуація можлива у випадку:

– обробки високочастотних компонент трансформованих відеосегментів в умовах загального визначення системи динамічних діапазонів (системи основ НРП базису) для всій трансформанти;

– відеосегменти містять в собі області різні за яркісним або кольоровим контрастом.

В свою чергу це призводить до того, що кодове значення E'_j в умовах зворотної лексикографії буде наближатися до максимально допустимої величини, а саме $E'_j\to\prod_{i=1}^{m}g_i-1$. Тому для виключення виявлених суперечних ситуацій ***пропонується*** створити таке правило лексикографії, для якого забезпечується адаптація до структурно-статистичних особливостей масивів даних, що обробляються.

Розглянемо другий варіант модифікації правила лексикографії щодо індексації значень елементів НРПЧ в межах відповідних робочих діапазонів.

Для модифікації правила лексикографії в системах НРП-кодування ***пропонується*** враховувати на кожному кроці відому інформацію щодо відхилень значень попередніх (раніше оброблених) елементів відносно відповідних основ. В цьому випадку забезпечується врахування

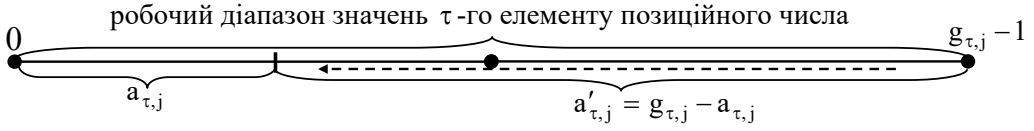


Рис. 1. Схема індексації значень елементів ПЧ відносно максимального рівня робочого діапазону для зворотного правила лексикографії

локальних структурно-статистичних закономірностей, а саме:

– у разі обробки сегментів відеоданих, що містять області двох та більше типів. Наприклад, на фоні когерентної області розмішені деталі або самі об'єкти; накладення декількох об'єктів один на одного; сегменти відеозображень, що містять в собі текстурні області;

– відеосегментів в спектральному або спектрально-часовому просторах, які містять області різних частот та відповідно нерівномірні значення динамічних діапазонів робочих інтервалів.

Для визначення ступеня поточного відхилення між значеннями основи $g_{\tau-1}$ та відповідного елементу $a_{\tau-1,j}$ пропонується оцінювати їх різницю на попередньому $(\tau-1)$-му кроці реверсного кодування. Тоді рішаючи правило P буде задаватись наступним співвідношенням:

$$P:\ a_{\tau-1,j} > \frac{g_{\tau-1}}{2}. \qquad (2)$$

Звідки можливі два варіанти, а саме, коли: виконується нерівність $a_{\tau-1,j} > g_{\tau-1}/2$; буде вірне те, що $a_{\tau-1,j} \le g_{\tau-1}/2$.

В першому випадку приймається прогнозне рішення відносно того, що значення елементу $a_{\tau,j}$ на τ-му кроці реверсного кодування наближається до величини основи g_{τ}. В цьому випадку пропонується застосовувати зворотне правило лексикографії. Навпаки для другого випадку прогнозний тренд вказує на те, що значення $a_{\tau,j}$ для τ-го елементу буде наближатися до нульового рівня відповідного робочого діапазону. Тут пропонується індексування значень елементу в робочому інтервалі здійснювати за прямою лексикографією.

Отже пропонується організовувати двонаправлену лексикографію в залежності від аналізу величини відхилення значень елементу та відповідної основи на попередньому кроці процесу реверсного кодування. В цьому випадку створюються умови для адаптації напрямку лексикографії, а саме напрямку індексування значень елементів НРПЧ в робочому діапазоні до локальних структурно-статистичних закономірностей масивів, що обробляються.

Висновки. Таким чином, можна стверджувати те, що створена методологія модифікації нерівноважної позиційної системи, яка базується на таких аспектах: формувати двовимірний нерівноважний позиційний базис на основі одночасного врахування структурних закономірностей за двома напрямками (рядків та стовбців). Тут усувається дисбаланс в процесі побудови системи основ в НВП-базисі за рахунок додаткової локалізації значень динамічних діапазонів; створення адаптивної двонаправленої лексикографії з врахуванням локальних структурно-статистичних закономірностей масивів, що обробляються шляхом аналізу величини відхилення значень елементу та відповідної основи на попередньому кроці процесу реверсного кодування.

Список літератури:

1. Eli Dworetzky, PictureEdgar Kaziakhmedov, PictureJessica Fridrich. Advancing the JPEG Compatibility Attack: Theory, Performance, Robustness, and Practice. Proceedings of the 2023 ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security. 2023. P. 67–79. URL: https://doi.org/10.1145/3577163.3595090.

2. A. Krasnorutsky, *et al.* "Integration of Video Image Decryption Coding into a Remote Video Information Service," *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies* (*AICT*), Lviv, Ukraine, 2023. P. 1–6, DOI: 10.1109/AICT61584.2023.10452679.

3. Omar H. M., Morsli M., Yaichi S. Image Compression using Principal Component Analysis. Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Mathematics and Information Technology (ICMIT). 2020. P. 226–231. DOI: 10.1109/ICMIT47780.2020.9047014.

4. Barannik, V. *et al.* (2023). A Method of Scrambling for the System of Cryptocompression of Codograms Service Components. In: Klymash, M., Luntovskyy, A., Beshley, M., Melnyk, I., Schill, A. (eds) Emerging Networking in the Digital Transformation Age. TCSET 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 965. Springer, Switzerland, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_26.

5. Dahyun Kang, Piotr Koniusz, Minsu Cho, Naila Murray. Distilling Self-Supervised Vision Transformers for Weakly-Supervised Few-Shot Classification & Segmentation. 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2023. P. 19627–19638. DOI: Bookmark: 10.1109/CVPR52729.2023.01880.

6. Garg G., Kumar R. Analysis of image types, compression techniques and performance assessment metrics: A review. Journal of Information and Optimization Sciences. 2022. Vol. 43, No. 3. P. 429–436. DOI: 10.1080/02522667.2022.2037282.

7. Цімура Ю., Костромицький А., Суханов О., Думич С. Метод кодування відеоданих в спектрально-параметричному просторі / Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. 2024. Випуск 4 (1). С. 61–69. DOI: 10.23939/ictee2024.01.061.

8. Benjamin Bross, Ye-Kui Wang, Yan Ye, Shan Liu, Jianle Chen, Gary J. Sullivan, Jens-Rainer Ohm. Overview of the versatile video coding (VVC) standard and its applications. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. Vol. 31 (Issue 10). P. 3736–3764, Oct. 2021. DOI: 10.1109/TCSVT.2021.3101953.

9. Shah T. J., Banday M. T. A Review of Contemporary Image Compression Techniques and Standards. Examining Fractal Image Processing and Analysis / eds. Nayak S. R., Mishra J. Hershey, PA : IGI Global, 2020. P. 121–157. DOI: 10.4018/978-1-7998-0066-8.ch006.

10. Uthayakumar J., Elhoseny M., Shankar K. Highly Reliable and Low-Complexity Image Compression Scheme Using Neighborhood Correlation Sequence Algorithm in WSN. IEEE Transactions on Reliability. 2020. Vol. 69, No. 4. P. 1398–1423. DOI: 10.1109/TR.2020.2972567.

11. Barannik, V. *et al.* (2023). A Method of Scrambling for the System of Cryptocompression of Codograms Service Components. In: Klymash, M., Luntovskyy, A., Beshley, M., Melnyk, I., Schill, A. (eds) Emerging Networking in the Digital Transformation Age. TCSET 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 965. Springer, Switzerland, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_26.

12. Barannik V. et al.: Significant Microsegment Transformants Encoding Method to Increase the Availability of Video Information Resource. *IEEE Advanced Trends in Information Theory* (*ATIT*)*:* proceedings of 2nd Intern. Conf. (Kyiv, Ukraine, November 25–27, 2020). Kyiv, 2020. P. 52-56. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349256.

Barannik V.V. METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR IMPROVING THE SYSTEM OF NONEQUILIBRIUM POSITIONAL VIDEO DATA ENCODING IN INFOCOMMUNICATION SYSTEMS

The article substantiates that an important direction for improving the quality of video information services is the enhancement of technologies and methods for video data compression. Currently, several video compression methods have been developed. It is proven that most widely tested and practically applied methods share a typical drawback: achieving the required practical compression rates is only possible at the cost of losing the visual quality (*integrity*) *of the video data. It is shown that this results from overly aggressive elimination of psychovisual redundancy. The article argues that two promising directions exist: developing methods that allow for adjusting parameters in the psychovisual model; and improving redundancy elimination technologies based on the identification of structural-positional features of video data. It is shown that the first approach has certain limitations when processing high-density aerial monitoring video images. Therefore, it is concluded that developing the second direction of compression methods is more crucial. It is substantiated that a technological solution for the structural approach to video data compression is the method of Nonequilibrium Positional* (*NQP*) *encoding. However, it is demonstrated that such methods have specific shortcomings, primarily related to the influence of the bases of lower-order NQP number elements on the process of determining the weights of higher-order elements. It is shown that the weight of the higher-order elements plays a defining role in the length of the code description. Hence, it is substantiated that further improvement of structural-class methods involves developing approaches to eliminate the deficiencies of NQP encoding technologies. The article presents the development of a methodology for modifying the Nonequilibrium Positional system based on the following aspects: the formation of a two-dimensional Nonequilibrium Positional basis by simultaneously accounting for structural patterns in two directions; the creation of an adaptive bi-directional lexicographic model that considers local structural-statistical patterns of processed arrays by analyzing the deviation values of elements and their corresponding bases at the previous step of the reverse encoding process.*

Key words: *infocommunications, unmanned platforms, video data, compression, nonequilibrium encoding.*

УДК 621
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/06

Бобронніков А.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев Д.Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМФОРТУ В ЖИТЛОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА СИСТЕМА ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

У статті зроблено акцент на дослідженні існуючих рішень за темою забезпечення комфорту (*comfort*) *в житловому середовищі.*

Розглянуто статті за темою дослідження, що використовують технології доповненої реальності, інтернету речей (*IoT*) *для визначення енергетичних втрат та машинного навчання для з'ясування найбільш комфортних умов для кожного з учасників дослідження. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих рішень.*

Виконано аналіз національного міжгалузевого стандарту ДСТУ Б EN ISO 7730. ЕРГОНОМІКА ТЕПЛОВОГО СЕРЕДОВИЩА, що є аналітичним визначенням та інтерпретацією теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD та його особливостей. Розглянуті поняття PMV (*Predicted Mean Vote – прогнозована середня оцінка*) *та PPD* (*Predicted Percentage of Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених*). *Розглянуто поняття місцевого теплового дискомфорту, що є наслідком нерівномірної роботи кліматичних пристроїв у приміщенні. Розглянута залежність між значеннями PMV та PPD що вказує на те, що кількість невдоволених тепловим станом середовища майже ніколи не дорівнює 0% навіть при найбільш сприятливому значенні PMV. Також згаданий стандарт спрощує розрахунок прогнозованої комфортності повітря виходячи з основних наступних параметрів: temperature radiant* (*середня температура випромінювання*), *air velocity* (*швидкість повітря*), *cloth* (*одиниця одягу*), *та met* (*метаболічна одиниця*).

Проаналізовано статті та патент за темою дослідження, що використовують стандарт ISO 7730. Згадано стандарт ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) *55, що практично повторює ISO 7730.*

Запропоновано спосіб розширення застосування цього стандарту на більшу кількість показників середовища, що формують відчуття комфорту. Розглянуто приклад застосування принципів з ISO 7730 для оцінки акустичного комфорту приміщення. Для визначення кривих та коефіцієнтів розрахунку PMV-PPD для акустичного комфорту варто залучити респондентів та провести дослідження. Планується використання штучного інтелекту (*AI*) *для розрахунку оптимальних коефіцієнтів PMV-PPD для акустичного комфорту.*

Ключові слова: *IoT, PMV, PPD, comfort, AI.*

Постановка проблеми. Комфортність середовища є важливим аспектом у забезпеченні як ефективного відпочинку, так і роботи будь-якої людини. Існуючі методи керування середовищем аналізують розглядають малу кількість параметрів, як-от температуру чи вологість у приміщенні. Дана робота направлена на створення високоефективних методів та системи забезпечення комфорту, яка враховуватиме розширену кількість параметрів середовища для забезпечення відчуття комфорту людини враховуючи індивідуальні особливості користувача. Можливе використання хмарних обчислень та штучного інтелекту для ефективного і своєчасного керування параметрами середовища.

Актуальність тематики підтверджується великою кількістю статей у ScienceDirect та патентів у Espacenet за ключовими словами «IoT», «AI», «comfort», «PMV», «PPD» в тому числі і за останні роки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним профільним документом, що регламентує термічний комфорт людини у приміщенні є національний міжгалузевий стандарт ДСТУ Б EN ISO 7730. ЕРГОНОМІКА ТЕПЛОВОГО СЕРЕДОВИЩА та є аналітичним визначенням

та інтерпретацією теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Він є перекладеним на українську мову стандартом ISO 7730 [1]. В Україні його використовують при проектуванні приміщень вже понад 10 років.

Стандарт вводить два важливих поняття: PMV (Predicted Mean Vote – (прогнозована середня оцінка) та PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених).

PMV дозволяє передбачити оцінку більшості людей щодо теплового комфорту середовища, в якому перебуватимуть опитувані. PPD, в свою чергу, дозволяє передбачити відсоток опитуваних, яким середовище комфортним не здається. Згадується у великій кількості статей та патентів.

Стандарт ASHRAE [2] (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 55 практично повністю повторює ISO.

Розглянемо графік співвідношення PMV та PPD на рис. 1.

Оцінюючи графік, ми можемо побачити, що згідно стандарту навіть при PMV = 0, що власне вважається найбільш оптимальним значенням, значення PPD є ненульовим, а саме 5%. Отже, для 5% людей навіть нейтральне значення комфортності середовища може здатися некомфортним, ідеального відчуття комфорту неможливо домогтися для 100% одночасно. У таблиці 1 приведена відповідність між значенням PMV та оцінками людей, що знаходяться в середовищі:

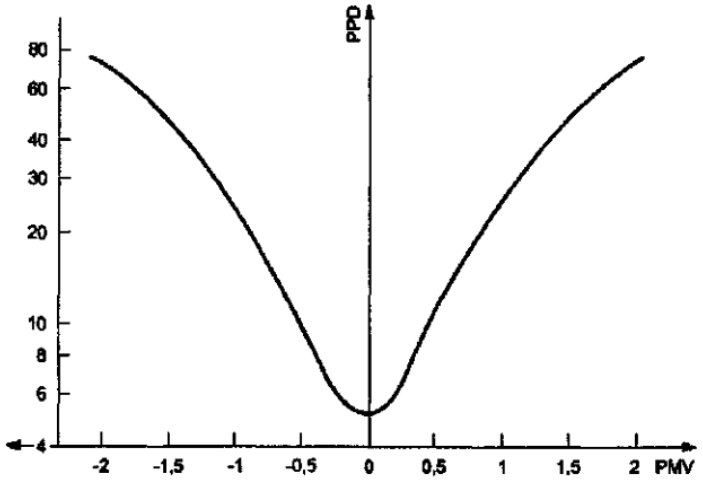
На жаль, не завжди виходить досягти однакових параметрів середовища в усіх точках приміщення, тому вводиться поняття локального дискомфорту.

До факторів локального дискомфорту відносять протяг, різницю температури повітря в області ніг та голови, різниця в температурі підлоги, стін, стелі. На рисунку 2 показано залежність між різницею температури в районі ніг та голови (при умові що людина сидить або стоїть).

Згідно з даними, достатньо різниці температури у 4°C щоб в середньому кожна десята людина відчула дискомфорт.

Таблиця 2 показує приклад розрахованих значень PMV.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0{,}03353 \cdot PMV^4 - 0{,}2179 \cdot PMV^2).$$



Позначки:
PMV – прогнозована середня оцінка;
PPD – прогнозований відсоток незадоволених

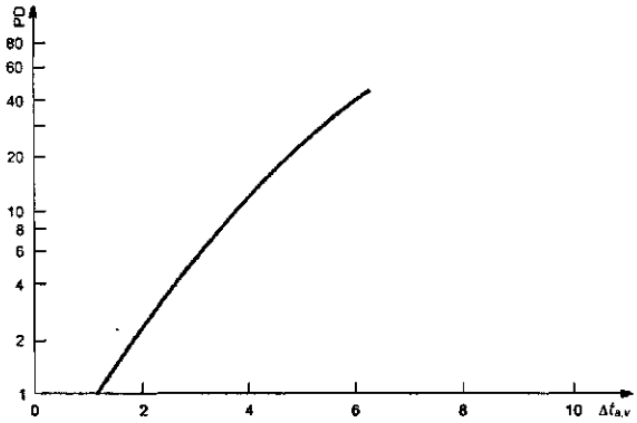
Key:
PMV – predicted mean vote
PPD – predicted percentage dissatisfied, %

Рис. 1. Співвідношення PMV та PPD

Таблиця 1

Відповідність оцінки PMV та стану середовища

Оцінка	Стан	Оцінка	Стан	Оцінка	Стан
+3	Спекотно	0	Нейтрально	-1	Трохи прохолодно
+2	Тепло			-2	Прохолодно
+1	Трохи тепло			-3	Холодно



Познаки:
PD – відсоток незадоволених;
$\Delta t_{a,v}$ – різниця температур повітря по вертикалі між головою і ногами, °C

Key:
PD – percentage dissatisfied, %
$\Delta t_{a,v}$ – vertical air temperature difference between head and feet, °C

Рис. 2. Місцевий дискомфорт, викликаний вертикальною різницею температур повітря

Таблиця 2

Приклади розрахованих значень PMV для 1 кло та 1 мет

Одяг Clothing		Еквівалентна температура, °C Operative temperature, °C	Відносна швидкість руху повітря, м/с Relative air velocity, m/s							
кло clo	$м^2 \cdot К/Вт$ $m^2 \cdot K/W$		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00
1,00	0,155	20	-0,85	-0,87	-1,02	-1,13	-1,29	-1,41	-1,51	-1,81
		21	-0,57	-0,60	-0,74	-0,84	-0,99	-1,11	-1,19	-1,47
		22	-0,30	-0,33	-0,46	-0,55	-0,69	-0,80	-0,88	-1,13
		23	-0,02	-0,07	-0,18	0,27	-0,39	-0,49	-0,56	-0,79
		24	0,26	0,20	0,10	0,02	-0,09	-0,18	-0,25	-0,46
		25	0,53	0,48	0,38	0,31	0,21	0,13	0,07	-0,12
		26	0,81	0,75	0,66	0,60	0,51	0,44	0,39	0,22
		27	1,08	1,02	0,95	0,89	0,81	0,75	0,71	0,56

Вводяться наступні одиниці вимірювання:
1 метаболічна одиниця = 1 мет = 58,2 $Вт/м^2$;
1 одиниця одягу = 1 кло = 0,155 $м^2 \cdot °C/Вт$.

Для даної таблиці рівень активності 1 мет. Таку енергію виділяє людина, коли вона сидить і не зайнята ніякою діяльністю. 1 кло – це, наприклад, одягнуті нижня білизна, сорочка, брюки, шкарпетки, черевики.

Для визначення оптимальної температури та швидкості повітря у приміщенні достатньо знайти значення найближче до 0. За нашою таблицею це PMV = 0,02 і воно може бути досягнути при встановленні температури на рівні 24°C та швидкості повітря 0,2 м/с.

Зменшення температури або збільшення швидкості повітря (наявність протягу) призводить до зміни оцінки PMV в сторону від'ємного значення, тобто до похолодання. Збільшення температури або зменшення швидкості повітря призводить до потеплішання.

Ключовим словом у розглянутих термінах є predictable, тобто «прогнозований». Даний стандарт є інструментом для визначення наскільки комфортним може бути середовище ще до моменту фактичного опитування людей в приміщенні з певними кліматичними параметрами. Якщо при проектуванні параметрів середовища не вдасться забезпечити значення PMV на рівні 0, то можна принаймні порахувати показник PPD, щоб мати очікування якій кількості людей середовище може здатися некомфортним в ту чи іншу сторону.

Постановка завдання. Ціллю статті є розгляд існуючих рішень за темою забезпечення комфортного середовища для людини у приміщенні. Акцент буде зроблено на статтях, що посилаються на стандарт ISO 7730. Також варто проаналізувати патенти технічних рішень, що використовують розглянутий стандарт.

Іншим завданням є розгляд можливих способів покращити існуючі методи забезпечення

комфорту. Проаналізувавши тенденції та основні недоліки існуючих рішень, можна оцінити, які аспекти варто покращити.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо [3]. Тему дослідження можна перекласти як «просторово-часове відображення в режимі реального часу та візуалізація теплового комфорту та керування системою опалення, вентиляції та кондиціонування повітря за допомогою інтеграції технологій доповненої реальності та бездротових сенсорних мереж із підтримкою Інтернету речей AR на Unity. Моделювання середовища за допомогою доповненої реальності».

В ході даного дослідження найголовнішим є використання AR (artificial reality) на рушії Unity [4]. Unity – багатоплатформовий інструмент для розроблення відеоігор і застосунків, і рушій, на якому вони працюють. В ході роботи він використовується для моделювання середовища за допомогою доповненої реальності.

Приклад застосування описаної концепції наступний:

1. У кімнаті встановлюються 4 датчики температури, по кожному в кутах приміщення.

2. Система створює тривимірне зображення приміщення, на якому присутні зображення інтер'єру та кордонів приміщення.

3. До зображення додаються виміряні параметри середовища. Це виглядає як області різних кольорів, де червоний зображує температуру вище за комфортну, синя – менша, а зелена відповідає нормі.

4. Користувач наочно бачить, в якій частині кімнати температура не у межах норми і дає команду системі змінити температуру (кліматичні прилади мають керуватися централізовано).

Орієнтовні показники, яке середовище вважати комфортним, береться з вищезгаданого стандарту.

До недоліків статті можна віднести недостатність інформації з приводу способу отримання даних для обрахунку PMV та PPD. Робота присвячена саме способам візуалізації (моделювання) середовища.

Розглянемо статтю [5]. Український переклад: «Додаток Інтернету Речей для виявлення енергетичної бідності на основі моніторингу теплового комфорту»

В ході дослідження вводиться поняття Energy Poverty (EP) – нездатність забезпечити належний рівень тепла, охолодження та освітленості.

Основною задачею роботи є розробка покращених методів знаходження EP. Методологія дослідження наступна:

В ході дослідження було проаналізовано наступні параметри: температура, вологість, якість повітря, освітленість. Припустимими параметрами є температура 18–24°C, вологість 30–60%, рівень CO2 1000ppm, освітлення 200 лк.

Щодо обладнання, було використана плата розробки ESP32 [6] та недорогі датчики. Використання онлайн баз даних на SQL.

В результаті розроблений дешевий метод моніторингу певних характеристик приміщення, які потім порівнюються з нормами і стандартами. Дозволяє зробити висновок наскільки поганим є рівень EP (іншими словами енергонеефективності).

До недоліків можна віднести те, що не врахована думка користувачів. Врахування думки користувачів є важливим, бо стандарти показують комфорт для «середньостатистичної людини». Також мало висновків про отримані результати: на що вони вказують? Вказані наслідки EP, але не вказані причини. Згідно дослідження (заміри були проведені в житлі небагатої сім'ї в Іспанії), майже всю добу температура >25°C, а вологість <30% що не є нормою відповідно до інформації ВООЗ. Робота направлена саме на способи моніторингу, а не усування проблеми дискомфортного клімату у приміщенні.

Розглянемо [7] «Застосування IoT та машинного навчання для оцінки сприйняття теплового комфорту».

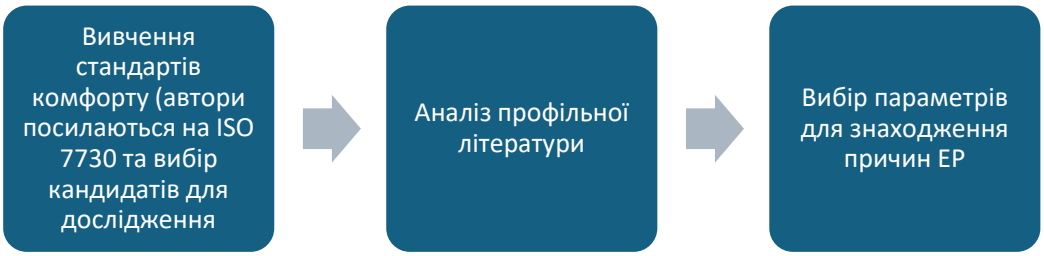


Рис. 3. Методологія дослідження

Мета дослідження – виявити найбільш комфортне для людини співвідношення між температурою робочого приміщення (офісу) та її вологістю. Особисті дані кожного учасника заносяться в таблицю 3.

До параметрів опитаних відносяться стать, вік, зріст, вага, посада та інші.

Кожен учасник носить браслет, що вимірює такі біологічні параметри організму, як частота серцебиття, інфрачервоний датчик насиченості крові киснем, також містить акселерометр.

Дані збираються кілька разів за секунду. Також проводиться регулярне опитування людей на предмет комфортності середовища в якому вони працюють за допомогою сервісу Google Forms [8].

За допомогою алгоритму штучного інтелекту розраховуються оптимальні значення температури та вологості повітря для кожного учасника. Результат базується на позитивних відгуках про комфортність середовища при наявних значеннях температури в певний момент часу.

На рисунку 4 показано найбільш оптимальні параметри температури та вологості за допомогою темних плям на графіках.

Очевидним є те, що поняття про комфортність середовища в різних людей не збігаються. Наприклад, згідно з результатами, найбільш сухе і гаряче повітря є комфортним для наймолодшої опитаної людини, жінка 29 років (користувач 5). В той же час 2 з 3 опитаних з найбільшою масою тіла (більше 80 кг) віддають перевагу більше вологому і холодному повітрю (користувач 2 та 3).

Важливим є присутність опитування користувачів та згадується важливість одного параметру над іншим. Більше присвячено аналізу результатів, ніж в минулій статті. В той же час, мало деталей про AI та Machine Learning. Є графіки, створені за допомогою ШІ, але недостатньо пояснень яким чином визначена важливість одних характеристик над іншими.

Розглянемо патент [9]. Описано метод та систему забезпечення правильних налаштувань температури обігріву та охолодження повітря. Використовується модель PMV-PPD. Крім кліматичних показників середовища враховуються також метаболізм людини (виділення тепла тілом) та термічний опір одягу.

Присутні налаштування планів відповідно до кількості спожитої енергії та ціни. Наприклад, план 1 працює до певного порогу витраченої енергії, а план 2 (більш енергоефективний) включається після. Через інтерфейс користувача обирається шаблон (вони вбудовані) або використовується тонка настройка.

Шаблони мають наступні параметри:

tr – temperature radiant – середня температура випромінювання;

vel – velocity – швидкість повітря;

clo – cloth – одиниця одягу;

met – метаболічна одиниця;

ew – external work – робоча активність людини.

На рисунку 6 зображено криву, що допомагає спрогнозувати значення PPD на рівні 19,2%:

Патент є хорошим прикладом застосування стандарту ISO 7730 в умовах реального проекту. Наявність готових шаблонів дозволяє швидко обрати бажаний сценарій відповідно до побажань користувача.

У вищерозглянутих роботах застосовується стандарт ISO 7730, що описує термічний комфорт людини в приміщенні. В той же час, температура,

Таблиця 3

Характеристики опитуваних

User	Age [y]	Weight [kg]	Height [m]	Gender [-]	Profession [-]	Test period [-]	Air temperature [°C] Avg. (St.dv)	Relative humidity [%] Avg. (St.dv)	Solar radiation [W/m^2] Avg. (St.dv)
1	61	61.4	1.75	Male	Senior researcher	Nov 13-17	6.2 (3.9)	85.7 (19.6)	222.0 (153.9)
2	39	81	1.78	Male	Researcher	Nov 6-10	9.3 (1.5)	98.1 (3.5)	102.8 (101)
3	35	85	1.79	Male	Researcher	Nov 6-10	9.3 (1.5)	98.1 (3.5)	102.8 (101)
4	43	46	1.64	Female	Researcher	Nov 20-24	7.2 (2.8)	96.2 (8.4)	143.4 (129.8)
5	29	60	1.60	Female	Junior researcher	Nov 27-30	2.5 (3.1)	88.8 (20.1)	172.0 (164)
6	37	57	1.79	Female	Researcher	Nov 20-24	7.2 (2.8)	96.2 (8.4)	143.4 (129.8)
7	33	80.2	1.91	Male	Technician	Nov 27-30	2.5 (3.1)	88.8 (20.1)	172.0 (164)
8	35	70	1.77	Male	Researcher	Nov 13-17	6.2 (3.9)	85.7 (19.6)	222.0 (153.9)

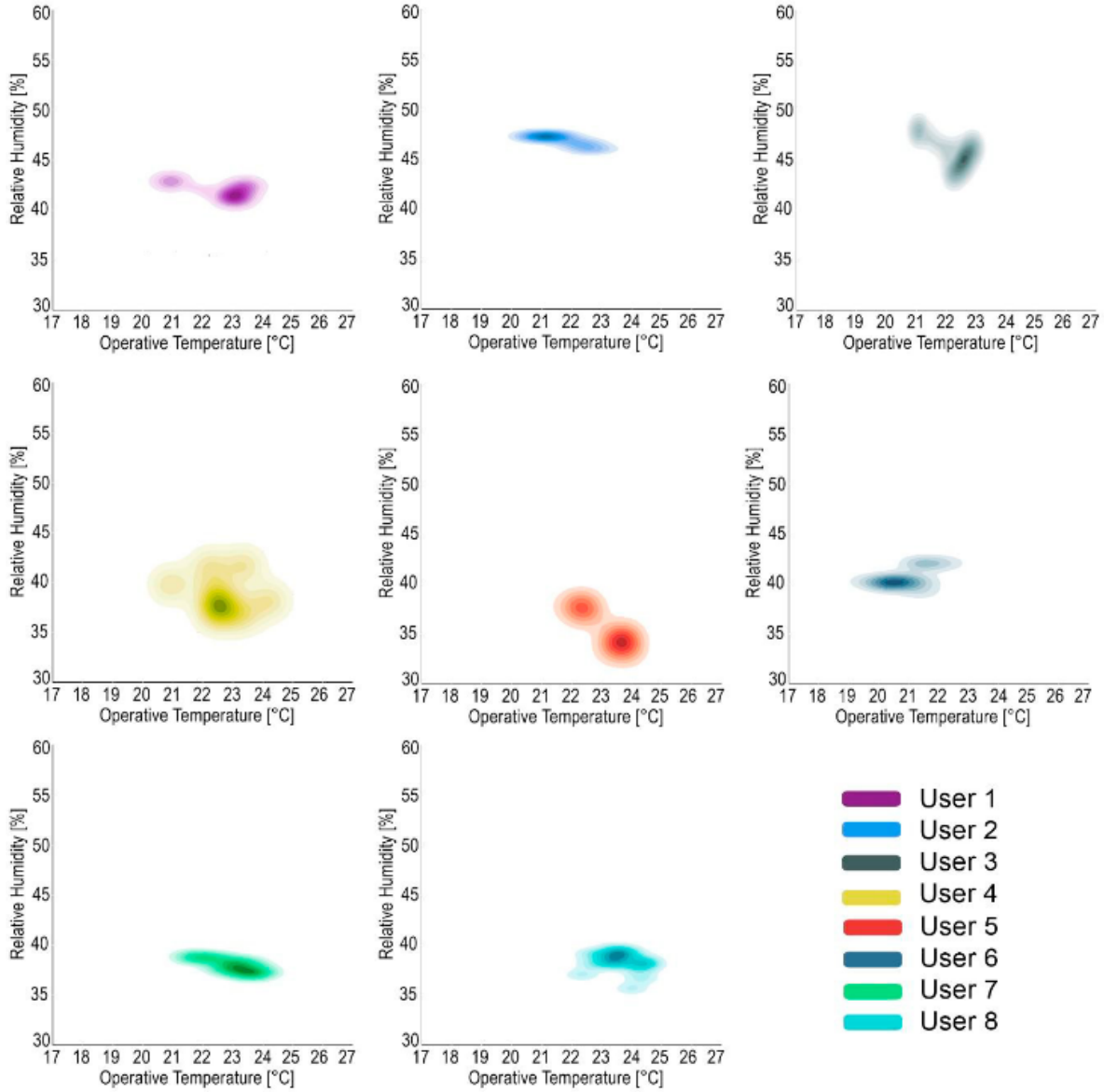


Рис. 4. Оптимальні параметри середовища для кожного з опитуваних

```
CONSTS = {
    1: { "tr": -3, "vel": 0.05, "clo": 1.0, "met": 1.2, "ew": 0 },
    2: { "tr": -2, "vel": 0.05, "clo": 0.9, "met": 1.2, "ew": 0 },
    3: { "tr": -1, "vel": 0.05, "clo": 0.8, "met": 1.2, "ew": 0 },
    4: { "tr": 0, "vel": 0.05, "clo": 0.7, "met": 1.2, "ew": 0 },
    5: { "tr": 0.5, "vel": 0.05, "clo": 0.6, "met": 1.2, "ew": 0 },
    6: { "tr": 1, "vel": 0.05, "clo": 0.5, "met": 1.2, "ew": 0 },
    7: { "tr": 2, "vel": 0.05, "clo": 0.4, "met": 1.2, "ew": 0 },
    8: { "tr": 3, "vel": 0.05, "clo": 0.3, "met": 1.2, "ew": 0 },
    9: { "tr": 2, "vel": 0.05, "clo": 0.4, "met": 1.2, "ew": 0 },
    10: { "tr": 1, "vel": 0.05, "clo": 0.6, "met": 1.2, "ew": 0 },
    11: { "tr": -2, "vel": 0.05, "clo": 0.8, "met": 1.2, "ew": 0 },
    12: { "tr": -3, "vel": 0.05, "clo": 1.0, "met": 1.2, "ew": 0 },
}
```

Рис. 5. Приклади готових шаблонів

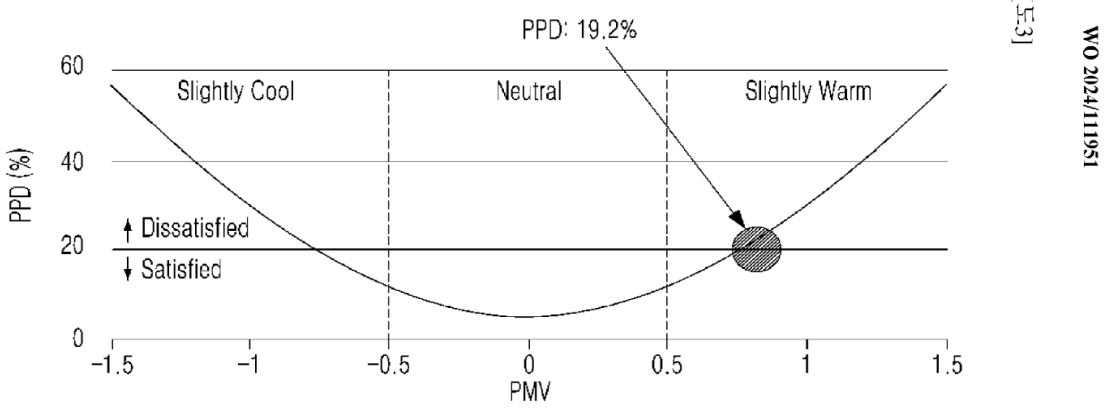


Рис. 6. Оцінювання PPD відповідно до рівня PMV

вологість та швидкість повітря є не єдиними факторами, які впливають на відчуття комфорту. На відчуття комфорту також можуть впливати такі показники середовища, як чистота повітря, освітленість робочого місця, шум, вібрації, та ін.

Розглянутий стандарт є зручним інструментом прогнозування середньої оцінки саме теплової комфортності середовища та прогнозування відсотка невдоволених користувачів. Дані методи можна розширити для використання з іншими показниками середовища, що впливають на комфорт.

Наприклад, PMV та PPD може бути застосований для оцінки акустичного комфорту приміщення. Шум негативно впливає на настрій та працездатність людини. З'явиться можливість передбачити, який рівень шуму в приміщенні не помічатиме більшість людей, що гарантуватиме найменше значення PPD.

Для визначення кривих та коефіцієнтів розрахунку PMV-PPD для акустичного комфорту варто залучити респондентів та провести дослідження.

Висновки. Проблема забезпечення комфорту в житловому приміщенні є актуальною зважаючи на кількість опублікованих робіт за останні роки. Стандарти ISO 7730 та ASHRAE 55 є галузевими стандартами в області забезпечення комфортного клімату в середовищі, де перебуває людина. Вони направлені на передбачення наскільки комфортним буде теплове відчуття середовища для більшості людей, а для якого відсотка людей – ні.

Сучасна техніка здатна точно вимірювати параметри середовища і швидко їх обраховувати. Складнощі можуть представляти саме способи керування середовищем у найефективніший для людини спосіб. Варто розглянути способи модифікації вищезгаданого стандарту для врахування більшої кількості параметрів середовища, що впливають на комфорт. Такими параметрами можуть бути чистота повітря, освітленість робочого місця, шум, вібрації, та ін.

Список літератури:

1. ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. URL: https://www.iso.org/standard/39155.html
2. Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. URL: https://surl.li/lgsqyt
3. Mohsen Mohammadi, Ghiwa Assaf, Rayan H. Assaad "Real-time spatial-temporal mapping and visualization of thermal comfort and HVAC control by integrating immersive augmented reality technologies and IoT-enabled wireless sensor networks: Towards immersive human-building interactions", Journal of Building Engineering, Volume 94, 2024, 109887, ISSN 2352–7102
4. Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D, VR & AR Engine. URL: https://unity.com/
5. Ascensión López-Vargas, Agapito Ledezma-Espino, "Iot application for energy poverty detection based on thermal comfort monitoring", Heliyon, Volume 9, Issue 1, 2023, e1 2943, ISSN 2405–8440
6. ESP32. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/ESP32
7. Francesco Salamone, Lorenzo Belussi, Cristian Currò, Ludovico Danza, Matteo Ghellere, Giulia Guazzi, Bruno Lenzi, Valentino Megale, Italo Meroni, "Application of IoT and Machine Learning techniques for the assessment of thermal comfort perception.", Energy Procedia, Volume 148, 2018, P. 798–805, ISSN 1876-6102
8. Google Forms. URL: https://docs.google.com/forms/u/0/
9. JI YOUNG MIN, KWON DONG WOO, METHOD AND SYSTEM FOR INFERRING OPTIMAL INDOOR COOLING/HEATING SETTING TEMPERATURE, Patent WO2024111951A1, 26.07.2024

Bobronnikov A.S., Lebedev D.Yu. METHODS OF PROVIDING COMFORT IN THE LIVING ENVIRONMENT AND A SYSTEM FOR THEIR IMPLEMENTATION

The article focuses on the study of existing solutions on the topic of ensuring comfort in the living environment.

Articles on the topic of research that use augmented reality technologies, the Internet of Things (IoT) to determine energy losses and machine learning to determine the most comfortable conditions for each of the study participants are reviewed. The advantages and disadvantages of existing solutions are analyzed.

The analysis of the national inter-industry standard DSTU B EN ISO 7730. ERGONOMICS OF THE THERMAL ENVIRONMENT is performed, which is an analytical definition and interpretation of thermal comfort based on calculations of PMV and PPD indicators and its features. The concepts of PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied are considered. The concept of local thermal discomfort is considered, which is a consequence of uneven operation of climate devices in a room. The dependence between the values of PMV and PPD is considered, which indicates that the number of people dissatisfied with the thermal state of the environment is almost never equal to 0% even at the most favorable value of PMV. The aforementioned standard also simplifies the calculation of predicted air comfort based on the following main parameters: temperature radiant (average radiation temperature), air velocity, cloth (clothing unit), and met (metabolic unit).

Articles and a patent on the topic of the study that use the ISO 7730 standard are analyzed. The ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) standard 55 is mentioned, which practically repeats ISO 7730.

A method for expanding the application of this standard to a larger number of environmental indicators that form a sense of comfort is proposed. An example of applying the principles of ISO 7730 to assess the acoustic comfort of a room is considered. To determine the curves and coefficients for calculating PMV-PPD for acoustic comfort, it is worth involving respondents and conducting research. It is planned to use artificial intelligence (AI) to calculate optimal PMV-PPD coefficients for acoustic comfort.

Key words: *IoT, PMV, PPD, comfort, AI.*

UDC 621.396.1
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/07

Vetoshko I.P.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Kravchuk S.O.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

INTEGRATION OF MACHINE LEARNING-BASED PREDICTION AND DYNAMIC QOS OPTIMIZATION INTO ADAPTIVE VONR SCHEDULING IN 5G STANDALONE NETWORKS: A SIMULATION-BASED APPROACH

The rapid development of fifth-generation networks in the Standalone (5G SA) variant puts forward new requirements for the implementation of voice services, in particular Voice over New Radio (VoNR), which are critically dependent on stable quality of service (QoS) indicators. Traditional radio resource scheduling algorithms, such as Round Robin and Proportional Fairness, are based mainly on instantaneous channel characteristics (SNR, CQI), without taking into account historical quality metrics such as jitter, delay, or packet loss, which leads to unstable operation of voice services in a variable radio environment. This is especially relevant for 5G SA, where there is no dependency on LTE infrastructure and all responsibility for QoS is placed on the new architecture.

The paper proposes a simulation-based approach to building an adaptive scheduler for VoNR that combines the prediction of modulation parameters using machine learning algorithms with dynamic optimization of MCS, QCI, and power consumption. Based on a decision tree ensemble model, the optimal modulation is estimated based on the current SNR value and the aggregated QoS performance of previous intervals. The simulation architecture implemented in MATLAB provides for modeling radio channel changes using Markov chains with three discrete states (Good, Average, Bad), which allows to reproduce realistic scenarios of mobile network operation. The adaptive scheduler integrates several levels of decision-making: ML model forecast, heuristic correction in favorable radio conditions, and dynamic class of service (QCI) control, which ensures that transmission parameters are matched to current and predicted channel conditions. The power consumption is also taken into account as a full-fledged QoS metric, which reduces the load on user equipment at high signal levels. A comparative analysis of three schedulers (Round Robin, Proportional Fairness, Adaptive) is carried out according to the key indicators: delay, jitter, packet loss, power consumption, throughput, and MOS.

The results of the study confirm that the adaptive ML scheduler demonstrates significantly better voice connection quality, especially in unstable radio channel conditions. The proposed approach minimizes losses and delays, stabilizes the MOS, and improves the power efficiency of the system without compromising the quality of service. Thus, the integration of machine learning into the decision-making loop for VoNR in 5G SA is a promising area that can be expanded by implementing multi-user scenarios, more complex ML models, and practical testing in real network infrastructure.

Key words: *VoNR, 5G Standalone, QoS, adaptive scheduling, machine learning, modulation, SNR, CQI, QCI, MCS, Round Robin, Proportional Fairness, Adaptive, ML scheduler, simulation modeling, MATLAB, Markov chains, MOS, power consumption, jitter, delay, packet loss.*

Formulation of the problem. The appearance of the 5G Standalone (SA) architecture has opened up opportunities for the full implementation of new types of services, among which VoNR (Voice over New Radio) connections play a key role. As opposed to transitional solutions, such as VoLTE or EPS fallback, the implementation of voice services in a fully independent 5G network requires solving a number of new challenges, including dynamic management of radio resources in a variable channel environment, ensuring a stable quality of service (QoS), and optimizing latency, loss, and power consumption.

In traditional scheduling schemes, such as Round Robin or Proportional Fairness, decisions about modulation parameters or class of service (QCI) are made primarily based on instantaneous channel characteristics, with little regard for historical trends or service context. This limits the system's ability to respond effectively to the dynamics of the network

environment, which is especially critical for voice connections that are sensitive to jitter, loss, and latency. In 5G SA-type networks, these limitations become even more critical, as the system must independently provide a full service stack without relying on LTE infrastructure. In addition, promising approaches to resource management involve the integration of intelligent mechanisms, such as machine learning, but their real-time application to voice traffic is still not well studied. This creates the necessity to develop adaptive schedulers capable of predicting changes in radio conditions and QoS parameters, changing modulation and MCS in accordance with the foreseen conditions, and reducing power consumption without compromising service quality. Solving these problems is a key step towards stable and efficient VoNR implementation in real 5G Standalone networks.

Analysis of recent research and publications. Ensuring quality of service (QoS) for voice services in fifth-generation (5G) mobile networks, in particular in the Standalone architecture, is the subject of active research in the scientific community. Particular attention is paid to the challenges associated with radio channel instability, including changes in signal-to-noise ratio (SNR), the impact of latency, jitter, packet loss, and the need to adapt modulation in real time. Works [1, 5] consider the importance of a guaranteed level of QoS for voice connections in VoNR networks and justify the necessity of adaptive radio resource management. Researchers in [7, 8] draw attention to the potential of machine learning in managing service parameters, in particular, the ability to predict modulation and CQI to improve the resilience of voice traffic to channel changes. Paper [13] proposes an ML-based scheduling approach that demonstrates the potential to reduce delays, but its adaptability is limited by the lack of integration with quality of service (QCI) and power management. In [3, 14], an overview of the QoS subsystem in the 5G architecture is provided, including QCI, MCS, CQI, and resource assignment mechanisms. At the same time, these works focus mainly on stationary traffic or lack the time aspect of radio channel changes, which limits the relevance of the approaches to real-world scenarios.

Some studies [9, 11] cover radio channel modeling using stochastic models, in particular Markov chains, but they are rarely combined with intelligent schedulers or do not cover the full set of QoS metrics critical for VoNR. Some publications [2, 12] offer separate heuristics for changing modulation when SNR changes, but without reference to the historical behavior of service parameters or machine learning.

A general review of published works leads to the conclusion that existing studies do not offer a comprehensive model that simultaneously takes into account QoS dynamics, modulation prediction, MCS and QCI adaptation, power consumption, and stochastic channel variability. This integration is the subject of this paper.

The purpose of this study is to investigate the possibilities of integrating predictive machine learning models into the process of adaptive radio resource planning for voice services in 5G Standalone networks. The main focus is on modeling and evaluating the effectiveness of an intelligent scheduler that changes modulation, MCS, QCI, and power consumption in accordance with dynamic radio conditions and quality of service (QoS) parameters. The work is aimed at building a full-fledged simulation model using stochastic approaches to radio channel modeling and implementing an ML module as an element of decision-making. The study involves a comparative analysis of traditional and adaptive schedulers to determine their ability to provide a stable voice connection under variable SNR conditions. This approach allows us to identify the advantages of adaptive architecture, reduce terminal power consumption, and improve user experience. In addition, the study provides a basis for further developments in the area of implementing intelligent schedulers in real telecommunications environments.

Summary of the main research material. In modern fifth-generation (5G) mobile networks, in particular in the Standalone (SA) variant, the provision of voice services via Voice over New Radio (VoNR) technology is a priority area of development for both operators and network equipment manufacturers. The main challenge of implementing VoNR is to ensure a guaranteed level of quality of service (QoS) in a changing radio channel, which is especially typical for mobile scenarios with dynamically changing signal-to-noise ratio (SNR), interference, signal fading and other factors inherent in the frequency bands in which NR operates. Traditional approaches to radio resource allocation in mobile communications systems are usually focused on fixed Channel Quality Indicator (CQI) thresholds, which are directly related to the choice of Modulation and Coding Scheme (MCS). In such models, which are used in standard schedulers, the level of service for voice traffic is determined purely by the current channel state,

without taking into account the historical behaviour of QoS parameters such as latency, jitter, packet loss, or power consumption. This creates significant risks for voice quality, as short-term channel degradations can lead to excessive degradation of end-user perceived parameters, such as MOS (Mean Opinion Score). In the case of voice services, such instability leads to signal distortion, dialogue breaks, lag, and other undesirable effects [1]. In addition, standard scheduling schemes are not optimised for power consumption, which is a critical factor in mobile terminals and IoT devices that may also use voice services in 5G.

In response to these challenges, this study modelled and implemented a new type of scheduler that dynamically adapts the transmission parameters of voice traffic depending on both instantaneous and aggregated QoS characteristics. The approach is based on the use of machine learning to predict the optimal modulation based on a combination of factors, and combining this prediction with heuristic logic that takes into account the physical parameters of the radio channel, service history, and current SNR level. Additionally, the MCS and QCI adaptation system is implemented, which allows not only to select the optimal modulation, but also to ensure the appropriate quality of service in accordance with the service category. In order to reproduce realistic scenarios of the adaptive scheduler, a full-fledged MATLAB simulation model was built, including the time generation of radio conditions, the use of a Markov model for the transition between radio channel states (Good, Average, Bad), the calculation of the full range of QoS metrics and the accounting of power consumption at each moment. This approach allows for comparisons between scheduling algorithms with simple resource allocation without QoS (Round Robin), QoS-oriented scheduling algorithms (Proportional Fairness), and the new ML-adaptive approach under the same network environment (Adaptive).

Thus, the proposed problem statement provides for a transition from static and isolated modulation adaptation mechanisms to a comprehensive and integrated approach, in which the decision to change transmission parameters is based on a multifactorial analysis of the QoS history, the current channel state, and the forecast model. A special feature of the approach is the inclusion of power consumption as a QoS indicator, which significantly extends the application scope of the scheduler in energy-sensitive scenarios.

Despite significant progress in the implementation of voice services in fifth-generation mobile networks, in particular, based on the VoNR architecture, there is still no single effective approach to managing radio interface resources that would ensure stable voice quality in a variable radio channel. Most implemented systems are based on fixed or linear-adaptive algorithms that rely exclusively on instantaneous CQI or SNR values. This ignores time dependencies, cumulative dynamics of QoS parameters, as well as factors associated with changes in the network environment, such as latency instability, increasing losses or accumulated jitter.

In addition, modern schedulers usually do not take into account the historical behaviour of traffic and are unable to identify situations where the quality of service deteriorates gradually rather than instantly. Such scenarios are especially critical for voice services. The user's perceived quality is not a linear function of just one parameter. Instead, it is formed as an integral effect of delays, losses, and jitter accumulated over several seconds. This necessitates the creation of a planning mechanism that is capable of multidimensional channel state estimation and adaptation of the relevant transmission parameters based on a combination of instantaneous and average QoS values.

An extra problem that needs to be solved is the lack of the ability of the scheduler to perform a coordinated adaptation of several parameters at once – modulation, coding scheme (MCS), class of service (QCI), and terminal power consumption mode – based on a holistic predictive analysis. In most practical implementations, there is fragmentation: for example, adaptation is performed only for MCS, while the choice of QCI or power mode remains static, or vice versa – the type of service is fixedly linked to the class of service without taking into account the actual state of the network. This limits the effectiveness of such solutions in real time. From a technical point of view, an important component of the problem is the lack of models that simultaneously take into account the variability of the radio channel over time, the dependence between successive QoS measurements, the stochastic nature of losses and latency, and the nonlinear dependence of MOS on input factors. Creating a simulation environment that reproduces such characteristics is a difficult but necessary condition for reliable testing of any next-generation scheduler. Thus, the study aims to address the identified problems by building an integrated model that allows:

– to combine the prediction of service parameters using machine learning with classical resource planning schemes;

– to take into account the time dynamics and historical values of QoS metrics (latency, jitter, losses) when making decisions on the choice of modulation and coding scheme (MCS);

– to perform automated selection of class of service (QCI) based on predicted radio conditions and service requirements;

– to dynamically adjust the power consumption of the terminal in accordance with the channel conditions and the selected modulation, which minimises power consumption without degradation of voice quality;

– to ensure the maintenance of a high average voice quality score (MOS) by adapting key transmission parameters in real time;

– to simulate smooth changes in channel conditions using a stochastic model of transitions between states (Markov chain), which approximates the modelling conditions to real-world scenarios.

Elements of scientific novelty.

The architecture for modelling and adaptive scheduling of voice services in a 5G SA network proposed in this study forms a number of significant scientific and technical innovations that distinguish it from existing approaches. The main elements of scientific novelty are both the simulation architecture itself and the introduction of innovative data-driven decision-making mechanisms. First of all, an original model of an adaptive resource scheduler was developed that combines analytical mechanisms for determining modulation with predictive algorithms based on machine learning methods. The peculiarity of the implementation is that the model takes into account not only the current SNR value but also the aggregated values of QoS metrics for previous periods of time when making decisions. This allows to take into account the inertia in the behaviour of the network channel and identify trends of deterioration or improvement of service that are not available for classical instant schedulers.

Another key contribution is the integration of modulation type prediction (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM) using an ML model based on four parameters: SNR, Latency, Jitter and Packet Loss. The use of an ensemble of models based on a decision tree allowed us to achieve high accuracy while maintaining the interpretability of decisions. In addition, the adaptive scheduler implements the logic of heuristic correction of ML-model solutions based on SNR thresholds, which avoids unjustified modulation reductions in favourable radio conditions.

For the first time, the dynamic interdependence between the predicted modulation, the chosen coding scheme (MCS) and the class of service (QCI) is implemented. In classical implementations, such parameters are fixed or statically set based on the traffic profile, while in the proposed model it changes according to the predicted channel conditions. Thus, the scheduler is able to automatically lower the priority of service in unfavourable conditions, or, conversely, increase the class of service when the QoS improves, which allows for more efficient use of resources and increased stability of voice traffic service.

It is worth noting the extension of the standard QoS model by including power consumption as a full-fledged metric for voice traffic. The model reduces power consumption at high SNR values and selects efficient modulation, which is relevant both for reducing the load on terminals and improving the efficiency of the network infrastructure as a whole.

Another element of scientific novelty is the construction of a time simulation using a Markov chain to model the smooth transition between the three states of the radio channel (Good, Average, Bad). Such a model allows reproducing signal quality fluctuations over time with greater accuracy than using independent Gaussian noise or fixed scenarios. This, in turn, ensures higher simulation reliability and allows us to evaluate the behavior of schedulers in realistic variable channel conditions. In addition, a new weighting formula for calculating MOS was proposed that takes into account the influence of three key factors – latency, loss, and jitter – with experimentally validated weighting factors. This approach makes it possible to simulate not only the technical efficiency of transmission, but also the subjective quality of voice perception by the user.

Overall, this study has created a holistic simulation platform for testing adaptive voice service scheduling algorithms in 5G SA that combines ML methods, simulation modeling, and engineering principles of modulation adaptation, providing a high degree of reliability and practical value of the results.

Simulation architecture in MATLAB.

To reproduce the behavior of an adaptive voice packet transmission scheduler in a 5G SA network, taking into account radio channel dynamics, variability of QoS metrics, and the impact of

machine learning, a full-fledged simulation model was implemented in MATLAB. The model structure includes several interconnected components: a dynamic SNR(t) generator, a stochastic model of radio channel states, a transmission planning subsystem with options for implementing various algorithms (Round Robin, Proportional Fairness, Adaptive), a QoS evaluation module, and a mechanism for integrating with the ML model [2]. The simulation takes place in the time dimension with a fixed step, which ensures that the input parameters change at each moment of time. The presented implementation uses a simulation horizon of 100 seconds with a sampling interval of 1 second (Fig. 1). For each moment of time t, a signal-to-noise ratio (SNR) value is generated that models the variability of radio conditions in a real environment. For this purpose, a combined model is used, which includes a sinusoidal component (simulating periodic changes in conditions due to mobility) and additive Gaussian noise, which models random disturbances. Additionally, SNR values are limited to a physically acceptable range (5–35 dB), which prevents the generation of unrealistic extremes.

After generating the SNR(t) value, each of the schedulers performs the corresponding voice traffic transmission scheduling procedure. In the case of classical approaches (Round Robin, Proportional Fairness), the algorithm uses fixed thresholds to determine the modulation and MCS, depending on the CQI, which is derived from the SNR value using a piecewise linear relationship. In the case of an adaptive scheduler, on the contrary, the input vector consists of the current SNR value and the aggregated values of QoS indicators for the previous three time intervals (latency, jitter, loss), after which it goes through a normalization procedure and is fed to the input of a machine model built on the basis of an ensemble of decision trees. The output of the machine model integrated into the adaptive scheduler is a categorical variable that determines the appropriate level of modulation in the current radio service conditions. The decision is based on four key input parameters: the current SNR value and the averaged values of latency, jitter, and packet loss over the last three simulation intervals. This approach allows taking into account not only the instantaneous state of the radio channel, but also the effects of inertial degradation or stabilization of the quality of service. However, given the potential errors of ML forecasting in conditions close to the limit values or when observing non-standard combinations of parameters, the model implements a heuristic procedure for adjusting the output. In particular, in cases where the SNR level exceeds 22 dB, the predicted modulation is checked for feasibility in terms of using the available radio resource. If the predictive model makes a decision in favor of a lower modulation (e.g., 16-QAM), which potentially limits the bandwidth in a high-quality channel, a forced uprate to 64-QAM is performed. Similarly, when the SNR is above 26 dB, an automatic transition to 256-QAM is allowed, even in the case of an indecisive forecast. This heuristic allows balancing between the caution of the ML model and the aggressive use of favorable conditions, which, in turn, ensures an increase in spectral efficiency without a significant increase in losses or a decrease in MOS [2]. The use of heuristic correction is especially justified in cases of short-term improvement of transmission conditions, since machine models that operate on average QoS values may demonstrate an inertial delay in response, which requires proactive intervention at the level of scheduler logic.

For each transmission session in the simulation, a network state is generated based on a Markov chain with three states (Good, Average, Bad), each of which has fixed parameters of latency, jitter, losses, and power consumption (Fig. 2). The transition matrix is designed to mimic the inertia of the channels: a state is highly likely to persist, but there

```
% Генерація динамічного SNR(t)
snrBase = 20;  % початковий рівень SNR
snrVec = snrBase + 5 * sin(2 * pi * timeVec / 50) + normrnd(0, 1, size(timeVec)); % шум + хвилі
```

Fig. 1. A snippet of the code for generating the dynamic signal SNR(t) in MATLAB. The value is formed on the basis of the baseline, sinusoidal variation, and normal noise, which together model periodic changes and random fluctuations in the radio channel

```
% Визначення наступного стану за допомогою Марковської моделі
currentState = find(mnrnd(1, transitionMatrix(currentState, :)));
```

Fig. 2. A fragment of the implementation of a stochastic transition between network states based on a Markov chain. For the currentState, the next state is selected according to the corresponding row in the transitionMatrix by the multivariate binomial distribution method

are also non-zero chances of transitioning to a neighboring state (for example, from Good to Average or vice versa), which corresponds to the behavior of a mobile user moving through coverage cells or changing the orientation of the device.

The QoS analysis module calculates the main metrics for each scheduler: average latency, average jitter, Packet loss rate, throughput, round trip delay (RTD), and average power consumption [3]. Based on these metrics, an integral quality indicator is calculated – MOS (Mean Opinion Score), which is modified to meet the requirements for voice services: the formula takes into account the weighted impact of latency, loss and jitter, with thresholds that meet current ITU-T recommendations.

The simulation results are accumulated in the data structure for each scheduler separately, which allows for a full-fledged comparative analysis of the performance of Round Robin, Proportional Fairness, and the proposed ML-based adaptive solution. In the final part of the simulation, a set of visualizations (graphs) is generated that demonstrate the dynamics of QoS metrics over time, as well as the behavior of parameters that directly depend on the scheduler – modulation, MCS, CQI, QCI. The resulting simulation is suitable for multifactorial analysis of schedulers' behavior under various radio channel conditions. Its structure allows to trace the impact of scheduling algorithms on key voice traffic quality indicators, including latency, jitter, losses, power consumption, and MOS, with high resolution, and ensures the reliability of conclusions about the effectiveness of the implemented adaptive mechanisms.

Description of schedulers.

The simulation model implements three types of schedulers that differ in their decision-making logic for selecting modulation, Modulation and Coding Scheme (MCS), and service quality for voice traffic [4]. The choice of these three algorithms is driven by the need to compare the proposed solution with basic and common strategies used in mobile communication systems.

The first type – Round Robin – is a basic scheduler that implements the simple principle of uniform distribution of radio resources among users without taking into account any quality of service parameters. In the implementation of this simulation, modulation and MCS are set according to fixed CQI thresholds that directly depend on the current SNR value. For example, if CQI < 7, 16-QAM is assigned, if $7 \leq CQI < 12$, 64-QAM is assigned, and if $CQI \geq 12$, 256-QAM is assigned. This scheme provides technical fairness, but completely ignores changes in latency, loss, or jitter, making it unsuitable for QoS-critical scenarios, such as voice traffic [2].

The second scheduler, Proportional Fairness (PF), is a QoS-oriented scheduling algorithm that attempts to balance efficiency and fairness based on the ratio of current to average user throughput. Modulation is determined based on CQI, but with a more flexible consideration of channel conditions. Although PF does not directly take into account latency or loss, it responds to the overall radio channel condition and is able to partially adapt to unstable conditions. However, its adaptation is not QoS-directed in the narrow sense – the scheduler does not adjust transmission parameters to ensure stable MOS or minimize jitter [5].

The third proposed scheduler, Adaptive, integrates a machine learning algorithm, heuristic logic, and a power adaptation mechanism. Unlike previous solutions, it is based not only on instantaneous channel parameters but also on the history of QoS metrics, including average latency, jitter, and percentage of losses. The input vector is fed to an ML model that determines the most appropriate modulation for the current conditions. Additionally, heuristic rules are implemented to increase modulation at high SNR regardless of the ML prediction, ensuring more aggressive resource utilization in favorable conditions [2].

In addition to modulation adaptation, the scheduler dynamically selects the appropriate Modulation and Coding Scheme (MCS) and binds it to the QoS Class Identifier (QCI) to ensure compliance with voice traffic service standards (e.g., QCI = 1 or QCI = 5) [6]. The model also provides a mechanism for reducing latency and losses by adjusting transmission parameters, which allows achieving higher MOS values compared to the baseline schemes. Thus, the proposed adaptive scheduler implements a multilevel decision-making strategy: ML-based forecasting, heuristic correction, dynamic assignment of transmission parameters, and power consumption optimization. This ensures flexibility, resistance to unstable channels, and improved QoS compared to traditional designs. Table 1 shows the comparative characteristics of the implemented schedulers.

Fig. 3 shows the change in modulation (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM) over time for each of the three implemented schedulers. The Round Robin scheduler demonstrates a fixed modulation selection logic based solely on the current CQI value. As a result,

Table 1

Comparative characteristics of the implemented schedulers

Scheduler	Main control parameter	Modulation dialing logic	Reaction to QoS metrics	QCI adaptation	Power consumption
Round Robin	CQI	Fixed thresholds	None	Static	Static
Proportional Fairness	CQI + Throughput ratio	Dynamic thresholds	None	Static	Static
Adaptive (ML)	SNR + QoS + ML	Forecast + heuristics	Includes 3 previous ones	Dynamic	Adaptive

the graph shows a relatively stable distribution of modulations, without a flexible response to changes in transmission conditions. While Proportional Fairness utilizes CQI and incorporates the ratio between current and average throughput to enable partial modulation adaptation, it does not consider QoS metrics such as latency or loss. By comparison, the proposed adaptive scheduler performs more dynamic modulation changes during the simulation. This is due to the fact that the modulation selection decision is based not only on SNR, but also on aggregated QoS metrics and machine model predictions. In combination with additional heuristic conditions, the adaptive scheduler is able to switch to higher modulation schemes in favorable radio conditions, even if the model predicted a more conservative value [7].

Thus, the graph clearly demonstrates that the adaptive design responds more sensitively to variations in the network environment than basic algorithms, which is a crucial advantage for QoS-sensitive traffic such as VoNR.

Machine Learning model integration for adaptive scheduling.

This study presents a machine learning model designed to support the development of an adaptive scheduler that accounts for the current channel state and QoS parameters by predicting the optimal modulation level (16-QAM, 64-QAM, or 256-QAM) under varying network conditions. The model is built on the basis of a training dataset generated by preliminary modeling of system behavior in different radio conditions and QoS parameters. A total of 2000 synthetic examples were collected, each containing input values: SNR, Latency, Jitter, and Packet Loss. These parameters act as a feature vector.

The training set contains a total of 2000 examples evenly distributed among the three main modulation classes: 16-QAM, 64-QAM, and 256-QAM. Table 2 summarizes the main statistical characteristics of

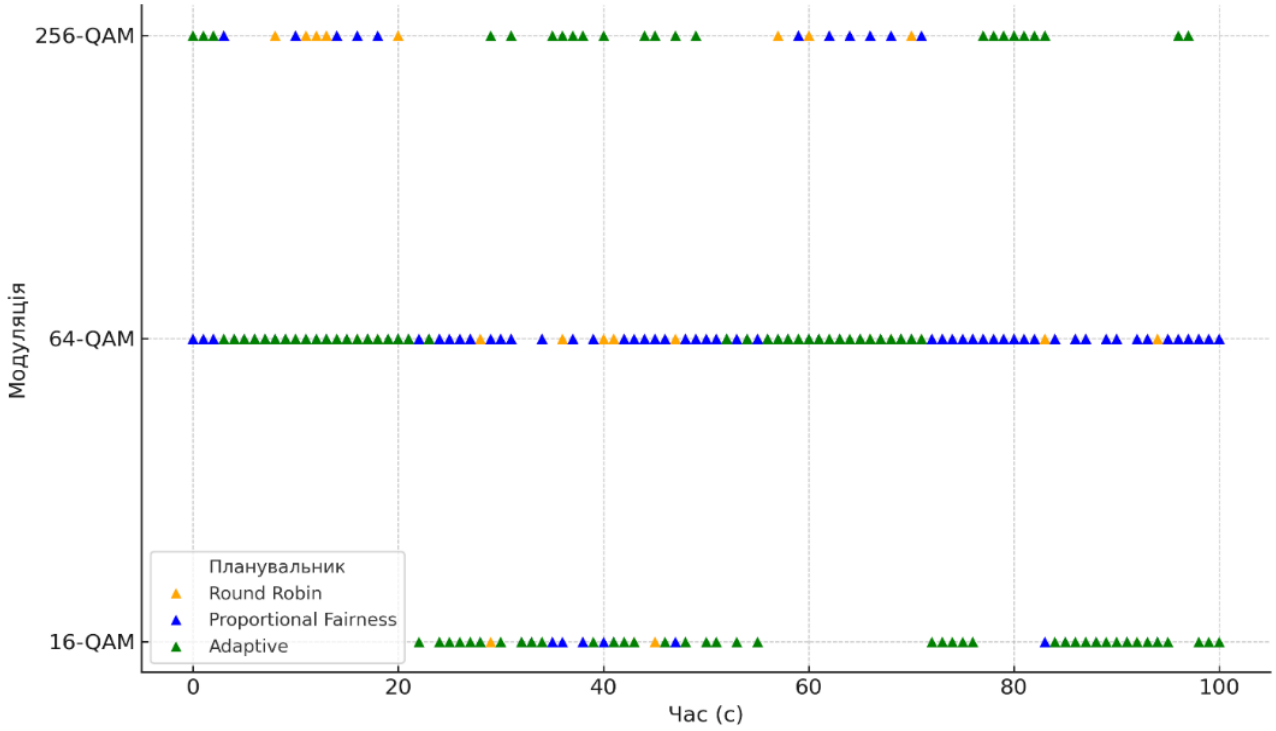


Fig. 3. Modulation change (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM) over time for three schedulers

Table 2

Input Feature Statistics – VoNR ML Training Set

	Average	Average deviation	Min	25%	Median	75%	Max
SNR	19.959	8.766	5.097	12.141	20.221	27.52	34.992
CQI	7.883	4.296	1.0	4.0	8.0	12.0	15.0
MCS	19.127	5.556	10.0	14.0	19.0	24.0	28.0
Latency	9.012	3.087	3.415	6.46	8.926	11.489	14.997
Jitter	1.366	0.583	0.349	0.863	1.358	1.845	2.499
Loss	1.61	0.913	0.078	0.858	1.59	2.34	3.499
Throughput	154.02	53.02	60.02	108.275	153.568	197.578	264.306
MOS	4.04	0.235	3.603	3.847	4.033	4.234	4.5
Power	1.039	0.429	0.3	0.665	1.041	1.399	1.798

the parameters used as input features, including average, minimum, and maximum values. The data encompasses a representative range of VoNR conditions and contains sufficient variability to enable the training of a machine learning model with high generalizability.

The target variable is represented as a categorical class – a type of modulation encoded in the form of three numerical labels. Before starting training, the input data were normalized to a single scale space, which avoids the overwhelming influence of individual parameters on the training process. To increase the reliability of the model, the sample was divided into training (80%) and test (20%) parts using stratified hold-out. As a basic classifier, an ensemble model of the Bagged Trees (Bootstrap Aggregation) type was chosen, which combines several decision trees into a stable model with high generalizability. The implementation used 200 trees, each of which is trained on a random subset of the training data. The depth of the tree is limited by setting the MaxNumSplits parameter to prevent overtraining [9]. This choice is due to the model's suitability for integration into a simulation environment, where it demonstrates a sufficient level of classification ability to predict modulation in a variable radio channel (Fig. 4). Although the absolute value of accuracy on the test set is limited, it is sufficient to support real-time decision-making in combination with heuristic rules and dynamic QoS context.

Fig. 5 shows the results of testing the model in the form of a mixing matrix. As can be seen from the graph, the model demonstrates the largest number of correct classifications for the 256-QAM class, but at the same time, there is a systemic bias – the model tends to assign higher modulation schemes even when the true value is lower. This is due to the peculiarities of the training set and the sensitivity of SNR as a feature. Such behavior is typical for models relying on aggregated QoS metrics without access to extended historical data. To address this, additional heuristic constraints were introduced during integration into the simulator to promote decision stability and mitigate potential losses. Thus, even with imperfect classification accuracy, the model is effectively used as a preliminary estimator in the adaptive scheduler loop.

After the training procedure, the model was saved as a .mat file and integrated into the general simulator as part of the adaptive scheduler. During the simulation process, at each step, the adaptive scheduler generates a vector of input parameters (SNR, average latency, jitter, and losses for the previous three time intervals), normalizes it, and feeds it to the model input. The resulting predicted modulation value is used as a key parameter for further selection of MCS, QCI, and power consumption [10]. To increase the reliability of the decisions made, as well as to avoid underestimation of predictions in favorable channel conditions,

```
% Навчання моделі на тренувальних даних
t = templateTree('MaxNumSplits', 20);  % контроль складності дерев
modulationTree = fitcensemble(X_train, y_train, ...
    'Method', 'Bag', ...
    'NumLearningCycles', 200, ...
    'Learners', t, ...
    'Prior', 'uniform');
```

Fig. 4. Implementation of training a classification model of the Bagged Trees type in MATLAB using 200 decision trees and a depth limit (MaxNumSplits)

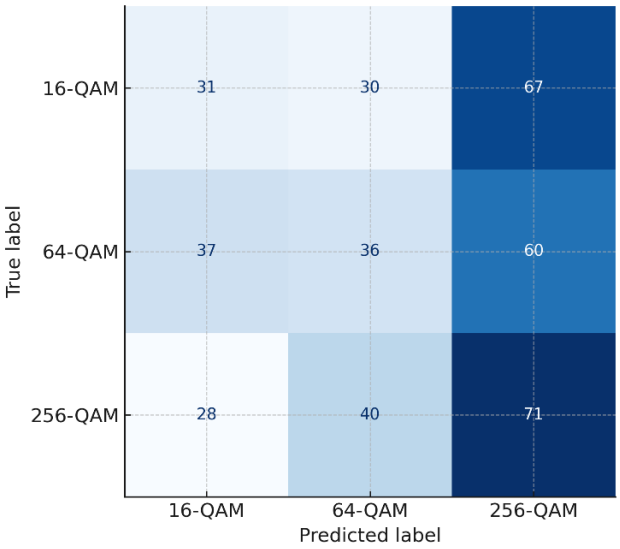


Fig. 5. Mixing matrix for predicting the type of modulation (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM). The predominant prediction of the 256-QAM class is observed, which is compensated by heuristic constraints in the adaptive scheduler

an additional heuristic correction module is implemented: at SNR > 22 dB, the system allows increasing the predicted modulation by one level, and at SNR > 26 dB – assigning 256-QAM regardless of the model's prediction, if it does not contradict QoS indicators. This approach allows balancing between the caution of the ML solution and the efficient use of resources in a high-quality radio channel. Thus, the implemented module is not limited to forecasting, but acts as an adaptive decision-making subsystem integrated into the radio resource management loop in a variable radio environment.

Markov model of channel states.

A stochastic model based on Markov chains with discrete states was used to model changes in the radio environment in real time. This approach allows to realistically reproduce the behavior of the radio channel in conditions of user mobility, changes in network load, and stochastic fluctuations caused by interference and multipath signal propagation [11]. In contrast to sinusoidal or static SNR variation models, the Markov model incorporates the channel's probabilistic inertia, providing a better approximation of realistic behavior in 5G Standalone networks.

Table 3 shows the state transition matrix. Thus, three states are used in the simulation: Good, Average, and Bad, each of which is characterized by fixed parameters of latency, jitter, loss probability, and power consumption. For example, in the Good state, the latency is ~5 ms, the loss probability is 3%, and the jitter is 0.5 ms. In the Bad state, these parameters increase according to the worse quality of the channel. This division provides sufficient variability to assess the impact of radio conditions on QoS parameters [11].

Table 3

Transition Probabilities Between Radio Channel States in the Markov Model

Current state	Good	Average	Bad
Good	0.80	0.15	0.05
Average	0.30	0.50	0.20
Bad	0.10	0.30	0.60

This matrix is constructed to reflect a high probability of maintaining the current state with a simultaneous non-zero probability of transitioning to an adjacent state. This way, the simulation takes into account both the short-term stability of transmission conditions and possible sudden degradations or improvements, for example, when the user changes position, moves between cells, or encounters interference. The next state is selected at each time point t using a multivariate binomial distribution (multinomial sampling) implemented in MATLAB using the mnrnd function (Fig. 6). This guarantees that the actual transitions correspond to the specified matrix and allows creating realistic patterns of radio channel behavior.

The simulation also accounts for the terminal's power consumption, which varies depending on the channel state: poorer transmission conditions require higher power levels to maintain connectivity.

```
179         for i = 1:numPackets
180             % Визначення наступного стану за допомогою Марковської моделі
181             currentState = find(mnrnd(1, transitionMatrix(currentState, :)));
182
183             % Моделювання затримки, джитера, втрат та енергоспоживання
184             currentDelay = max(0, stateDelays(currentState) + normrnd(0, stateJitter(currentState))); % Плавніші затримки
185             currentJitter = abs(normrnd(stateJitter(currentState), 0.5)); % Джитер
186             currentPower = statePowerConsumption(currentState); % Енергоспоживання
187             currentRoundTripDelay = currentDelay * 2; % Затримка кругового шляху
```

Fig. 6. Implementation of the selection of the next channel state based on probabilities from the transition matrix using the mnrnd() function in MATLAB

For each of the three states (Good, Average, Bad), the corresponding power consumption values are set (0.5, 1.0, and 1.5 W, respectively). These values were selected based on analytical models and publications that indicate the typical range of power consumption of user equipment (UE) in VoNR mode – usually in the range of 0.5–1.5 W, depending on signal strength, modulation, and transmitter activity. To summarize, the model allows not only to analyze QoS indicators, but also to evaluate the power efficiency of different schedulers in the dynamics [12].

Simulation of changes in channel states in the time dimension allows tracking not only instantaneous QoS values, but also cumulative effects such as accumulated latency, loss variability, or power consumption, which are critical when serving voice traffic with strict requirements for connection stability [13]. Thus, the stochastic model of channel states is the basic element of the simulation environment that the adaptive scheduler relies on when making decisions.

Measurable Quality of Service (QoS) metrics.

The simulation model evaluates all key QoS metrics that are critical for the operation of voice services in 5th generation networks. The indicators are calculated in the time dimension with a fixed interval of 1 second. This approach allows tracking the change of QoS indicators in dynamics and comparing the effectiveness of different schedulers in realistic conditions. Fig. 7 shows the change in the integral MOS (Mean Opinion Score), which assesses the subjective quality of a voice connection based on latency, loss, and jitter. All schedulers demonstrate a waveform that corresponds to the sinusoidal nature of SNR changes in the simulation. The most pronounced fluctuations are observed for Round Robin and Proportional Fairness, which do not have built-in mechanisms for smoothing or taking into account historical QoS indicators. The Adaptive Scheduler, although it demonstrates a similar fluctuation rhythm, provides a higher MOS level almost throughout the entire interval. This indicates that even when conditions are variable, it provides a more effective response to channel degradation. The reason for the sinusoidality is that SNR(t) itself has a wave nature, and the ML model does not work on the basis of perfectly inert smoothing, but with a delay of one or two steps – due to the aggregation of QoS metrics. In other words, adaptation does not stop the oscillations completely, but reduces their amplitude and improves the overall quality level.

Latency is one of the most critical parameters for voice traffic. The graph shows that Round Robin and Proportional Fairness demonstrate a relatively stable but high average latency (~9–10 ms), which almost does not change in response to channel degradation (Fig. 8). In the case of Round Robin, this is the result of a complete lack of adaptation, and in PF, it is a consequence of limited sensitivity to QoS [15]. The adaptive scheduler, on the contrary, responds to changes in the channel state. Its graph shows lower latency values in high SNR conditions, but also fluctuates with the same frequency as SNR(t). This indicates two things:

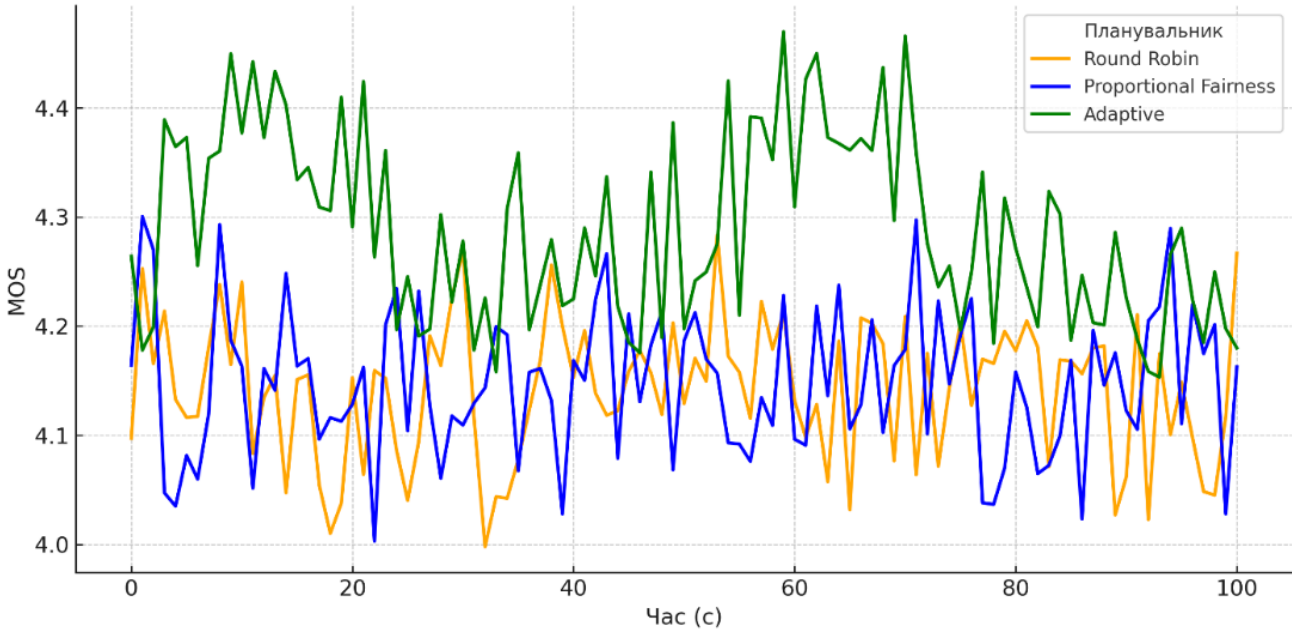


Fig. 7. MOS dynamics over time

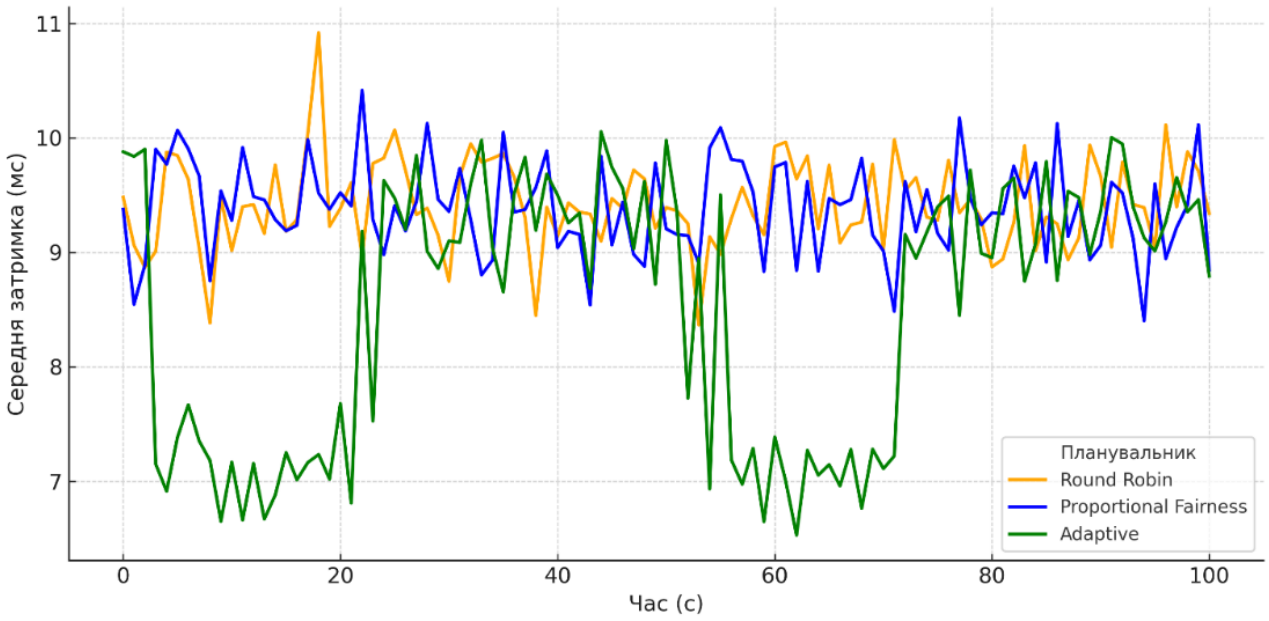


Fig. 8. Average latency

1) The scheduler changes modulation and transmission parameters in response to signal phases.

2) Latency fluctuations are not a sign of instability, but the result of active adaptation to changing radio conditions, which provides local minima when the channel improves.

Thus, even in the presence of a wave structure, the adaptive scheduler demonstrates higher efficiency and flexibility, allowing to avoid delay in critical phases.

Packet loss is a key metric for voice services, especially in the context of 5G SA, where the lack of real-time HARQ compensation means that losses directly affect voice quality [16]. Fig. 9 shows that Round Robin demonstrates regular loss peaks synchronized with a decrease in SNR – which is fully consistent with the absence of any adaptation mechanism. Proportional Fairness partially smooths out these spikes by better managing resource allocation, but it also does not take active action when the channel quality decreases.

The adaptive scheduler demonstrates a much lower level of packet loss throughout the entire

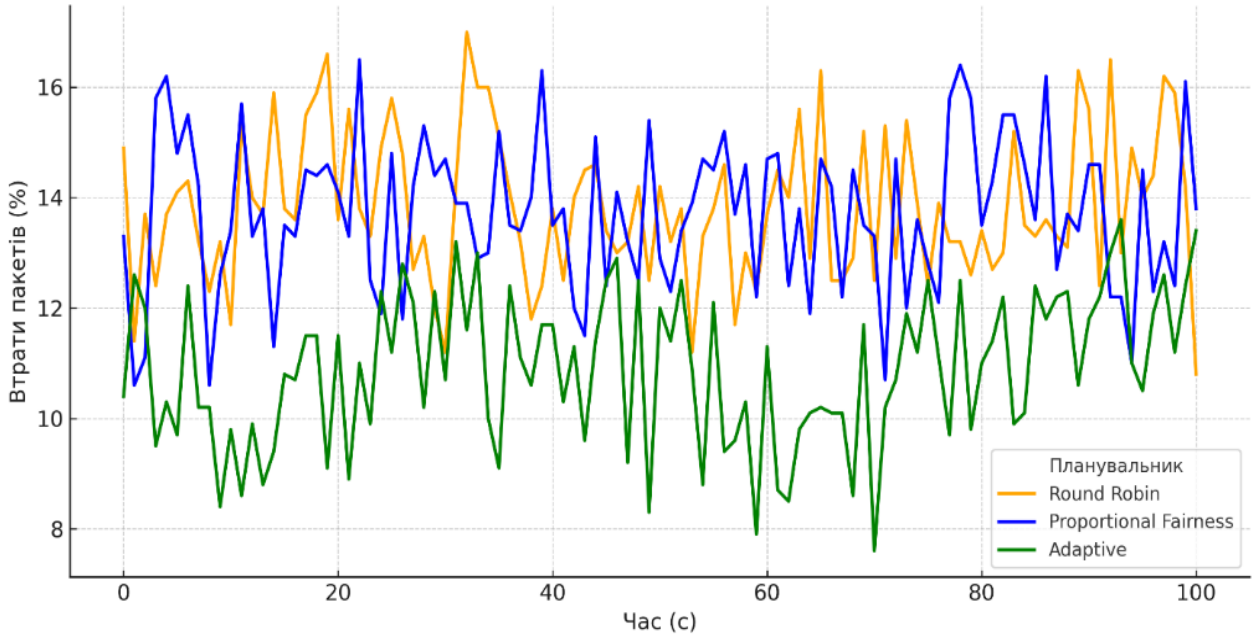


Fig. 9. Dynamics of packet loss (%)

simulation period. This is explained by its ability to change the modulation and MCS parameters to less aggressive ones in a timely manner as soon as a tendency to degrade the quality of service is detected [17]. Although the model does not always manage to completely avoid peak losses – in particular, due to the limited accuracy of machine forecasting and the latency caused by smoothing historical data – the adaptive scheduler effectively reduces the amplitude of loss fluctuations. The periodic structure of the graph is preserved in this case as well, due to the sinusoidal nature of the input SNR, but the oscillation pattern for Adaptive has a much lower amplitude. This indicates not passive imitation of radio conditions, but active adaptation to their changes in real time using both current and historical QoS metrics.

Jitter is another critical QoS metric for VoNR, as instability in packet delivery time causes noticeable audio distortion [2]. Fig. 10 shows that jitter in basic schedulers (especially in PF) is periodic in nature with an amplitude correlated to the low SNR phases. These schedulers fail to mitigate jitter fluctuations because they do not account for the QoS implications of modulation changes.

The adaptive scheduler demonstrates much better behavior: although waviness is present (due to the nature of SNR(t)), the jitter amplitude is much smaller and the transient phases are less pronounced. This indicates:

– less aggressive modulation selection under unstable QoS conditions;

– successful response to short-term degradation by taking into account previous values (latency, loss, jitter);

– adjusting transmission without drastic changes.

Reducing jitter fluctuations has a positive effect on the overall MOS, which is consistent with the previous analysis (Fig. 7).

Fig. 11 shows the change in power consumption over time for the three implemented schedulers. As can be seen from the graph, the basic Round Robin and Proportional Fairness algorithms do not have any mechanisms for dynamically reducing power consumption – they generate consistently higher values regardless of changes in radio channel conditions [2]. Their power profile remains at around 0.84–0.86 W with noticeable peaks. In contrast, the adaptive scheduler implements a heuristic to reduce power consumption in favorable conditions, in particular when combining high SNR and using highly efficient modulation (256-QAM). This reduces the transmit power at the user equipment (UE) during favorable radio conditions without sacrificing QoS. As a result, the average power consumption of Adaptive during the simulation is the lowest among all implemented schedulers (in the range of 0.80–0.83 W), and the nature of its change is more smooth.

Thus, Adaptive demonstrates not only higher quality of service, but also power efficiency, which is especially important for user devices with limited power resources.

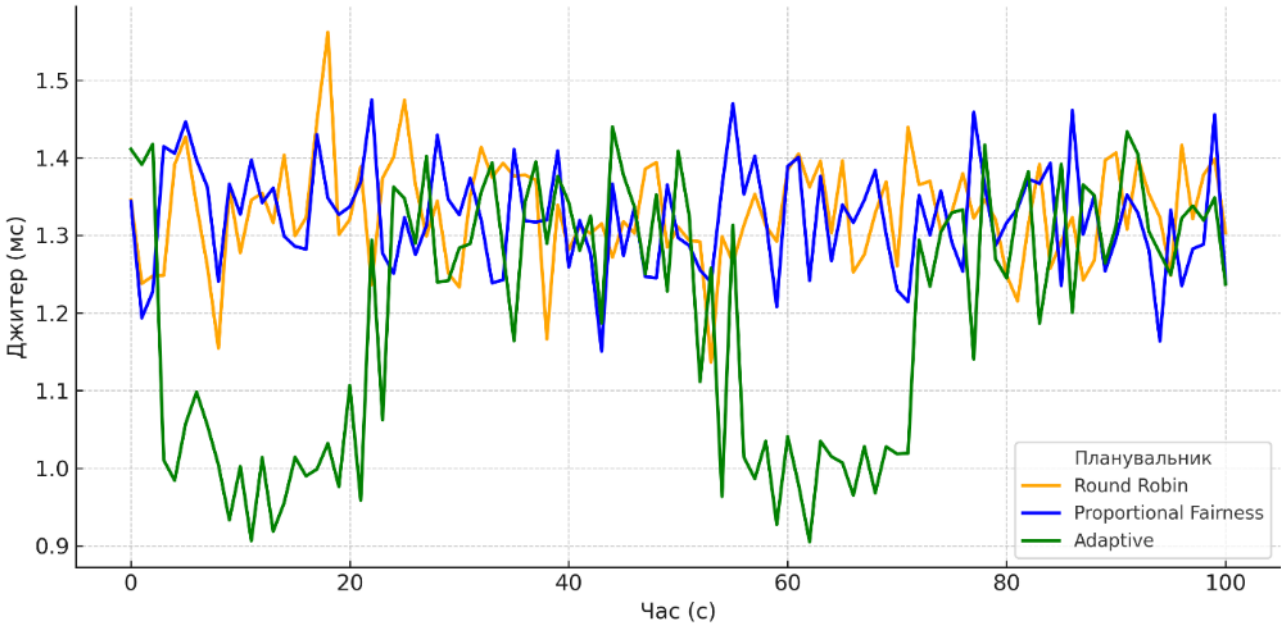


Fig. 10. Jitter

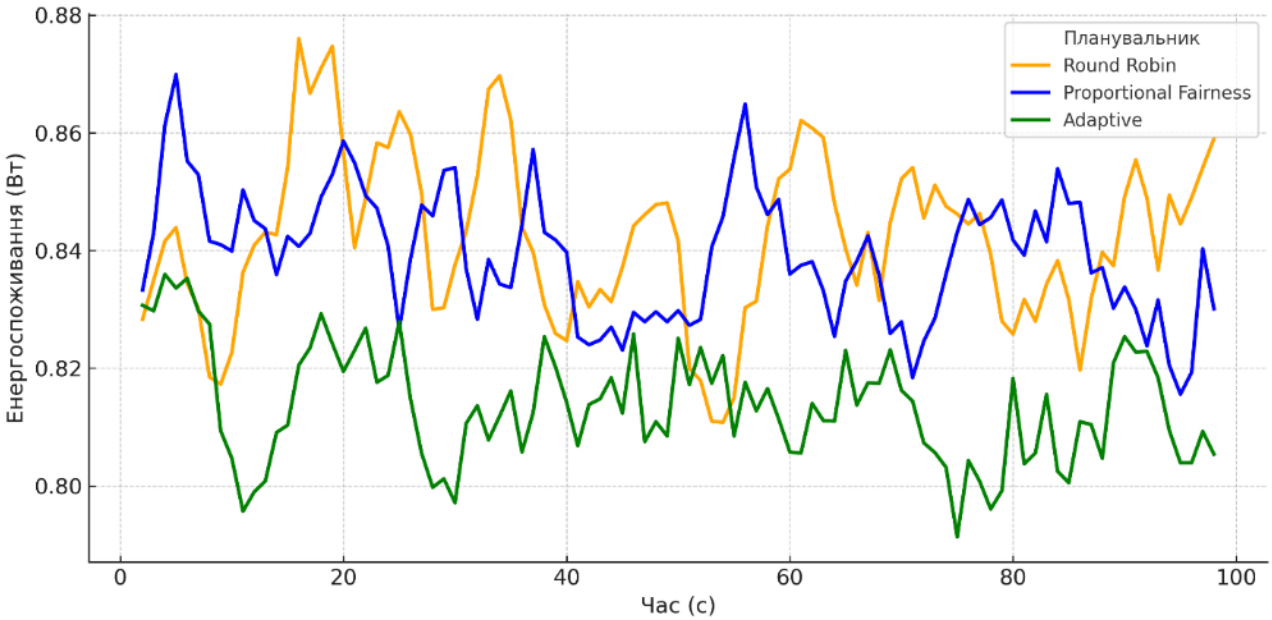


Fig. 11. Power consumption of 5G voice services over time depending on the scheduler

Conclusions. This paper presents a simulation study of an adaptive voice service scheduler in a 5G SA network that combines machine learning techniques with dynamic QoS optimization. The proposed architecture integrates ML-prediction of appropriate modulation based on current and historical QoS metrics, and implements heuristic rules for transmission adaptation and power control. The MATLAB simulations enabled a comparative evaluation of three schedulers (Round Robin, Proportional Fairness, and Adaptive) in a dynamic radio environment modeled using a Markov-based approach. The results demonstrate the advantages of the adaptive design in reducing latency, jitter, and packet loss, improving the Mean Opinion Score (MOS), and lowering power consumption under favorable transmission conditions.

Thus, integrating the ML model into the radio resource management process enhances the flexibility and adaptability of the VoNR system in 5G Standalone networks, representing a promising direction for further research and practical deployment. Future work may extend this approach by incorporating more advanced forecasting models, supporting multi-user scenarios, and enabling implementation on software-defined radio (SDR) platforms.

Bibliography:

1. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Структурні особливості реалізації голосових послуг VONR в мережі мобільного зв'язку стандарту 5G. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35, No 1. P. 27–33.

2. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Пріоритизація голосового трафіку в 5G: роль планувальників у забезпеченні QOS. *Дев'ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій»*, (Kyiv, 14–18 April 2025) Kyiv, 2025. P. 189–192.

3. 3GPP TS 23.501 version 17.9.0 Release 17. System architecture for the 5G System (5GS). Effective from 2024–12–20. Official edition. FRANCE: 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex, 2024. 530 p.

4. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. 2nd ed. London: Academic Press, 2020. 600 p.

5. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Possibilities of improving the voice services quality in 5G networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2023. Vol. 14, No 2. P. 9–16.

6. Vetoshko I., Noskov V. Evaluation of voice transmission quality in the LTE networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2021. No. 2. P. 22–26.

7. Кравчук С.О. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура: навч. посіб. за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. О. Кравчук; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 18,17 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 683 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53198

8. Sun Y., Peng M., Zhou Y., Huang Y., Mao S. Application of machine learning in wireless networks: key techniques and open issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, No. 4. P. 3072–3108.
9. Kwon J., Park J., Rhee W. A QoS-aware adaptive resource allocation scheme using CQI and MCS for LTE-A networks. *Wireless Personal Communications*. 2014. Vol. 76. P. 193–207.
10. MathWorks. Train Classification Trees Using Classification Learner App. URL: https://www.mathworks.com/help/stats/classificationlearner-app.html (дата звернення 16.02.2025).
11. Yuan L., Guo T., He Y., Cheng Z. The Application of Markov Model Optimization Method in Wireless Channel Modeling. *IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems* (*ICCCAS*). IEEE. 2018. P. 204–208.
12. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Opportunities to Improve the Quality of Voice Services in 5G Networks. *IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics* (*UkrMiCo*). Kyiv, Ukraine. 2023. P. 92–97.
13. Ali A., Xie J., Ullah N. Machine learning-based adaptive scheduling for QoS enhancement in 5G networks. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 12345–12356.
14. Vora P. Voice over 5G (Vo5G): Technical Challenges and Performance Evaluation. *IEEE Communications Magazine*. 2021. Vol. 59, No. 10. P. 16–22.
15. Cisco. 5G QoS Architecture and Mechanisms. Cisco White Paper. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/5g-qos/white-paper-c11-742292.html (дата звернення 14.01.2025).
16. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Взаємодія та співіснування мереж радіодоступу LTE/NR. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74) № 3, Р. 22–29.
17. GSMA. QoS Framework for 5G Services. GSMA Technical Report. London, 2022. URL: https://media.gsma.com/assets/2022/annual_report.pdf (дата звернення 07.03.2025).

Ветошко І.П., Кравчук С.О. ІНТЕГРАЦІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ДИНАМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ QOS В АДАПТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ VONR У МЕРЕЖІ 5G STANDALONE: СИМУЛЯЦІЙНИЙ ПІДХІД

Стрімкий розвиток мереж п'ятого покоління у варіанті Standalone (*5G SA*) *висуває нові вимоги до реалізації голосових сервісів, зокрема Voice over New Radio* (*VoNR*)*, які є критично залежними від стабільних показників якості обслуговування* (*QoS*)*. Традиційні алгоритми планування радіоресурсів, такі як Round Robin та Proportional Fairness, базуються переважно на миттєвих характеристиках каналу* (*SNR, CQI*)*, не враховуючи історичні метрики якості, такі як джитер, затримка або втрати пакетів, що призводить до нестабільної роботи голосових сервісів у змінному радіосередовищі. Особливо це актуально для 5G SA, де немає залежності від LTE-інфраструктури, і вся відповідальність за забезпечення QoS покладається на нову архітектуру.*

У статті запропоновано симуляційний підхід до побудови адаптивного планувальника для VoNR, який поєднує прогнозування параметрів модуляції за допомогою алгоритмів машинного навчання з динамічною оптимізацією MCS, QCI та енергоспоживання. На основі моделі ансамблю дерев рішень здійснюється оцінка оптимальної модуляції залежно від поточного значення SNR та агрегованих QoS-показників попередніх інтервалів. У симуляційній архітектурі, реалізованій у MATLAB, передбачено моделювання змін радіоканалу за допомогою ланцюгів Маркова з трьома дискретними станами (*Good, Average, Bad*)*, що дозволяє відтворити реалістичні сценарії функціонування мобільної мережі. Адаптивний планувальник інтегрує декілька рівнів прийняття рішень: прогноз ML-моделі, евристичну корекцію у сприятливих радіоумовах та динамічне керування класами обслуговування* (*QCI*)*, що забезпечує узгодження параметрів передачі з поточними та прогнозованими умовами каналу. Також враховується енергоспоживання як повноцінна QoS-метрика, що дозволяє знижувати навантаження на користувацьке обладнання при високих рівнях сигналу. Проведено порівняльний аналіз трьох планувальників* (*Round Robin, Proportional Fairness, Adaptive*) *за ключовими показниками: затримка, джитер, втрати пакетів, енергоспоживання, пропускна здатність та MOS.*

Результати дослідження підтверджують, що адаптивний ML-планувальник демонструє істотно кращі показники якості голосового з'єднання, особливо в умовах нестабільного радіоканалу. Запропонований підхід дозволяє мінімізувати втрати та затримки, стабілізувати MOS та підвищити енергоефективність системи без зниження якості сервісу. Таким чином, інтеграція машинного навчання в контур прийняття рішень для VoNR у 5G SA є перспективним напрямом, що може бути розширений шляхом реалізації мультикористувацьких сценаріїв, складніших ML-моделей та практичної апробації в умовах реальної мережевої інфраструктури.

Ключові слова: *VoNR, 5G Standalone, QoS, адаптивне планування, машинне навчання, модуляція, SNR, CQI, QCI, MCS, Round Robin, Proportional Fairness, Adaptive, ML-планувальник, симуляційне моделювання, MATLAB, ланцюги Маркова, MOS, енергоспоживання, jitter, затримка, втрати пакетів.*

УДК 621.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/08

Гаркавенко О.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губар В.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПОРТАТИВНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Стаття присвячена розробці та експериментальному дослідженню концепції портативного пристрою для об'єктивного вимірювання вібраційних характеристик дорожнього покриття. У статті розкрито проблему обмеженості існуючих методів оцінки якості дорожнього покриття, таких як суб'єктивний візуальний огляд та громіздкі профілометри, що значно ускладнює оперативний моніторинг. Розкрито основну ідею використання високочутливого акселерометра для фіксації динамічних вібрацій під час руху та їх інтеграції з точними GPS-координатами. Визначено, що це дозволяє створювати детальні «вібраційні мапи» для локалізації проблемних ділянок та автоматично розрізняти типи покриття (асфальт, бруківка, плитка), а також ідентифікувати дефекти, такі як вибоїни та ями, що є критично важливим для проактивного обслуговування.

З'ясовано, що використання електросамоката як мобільної платформи для збору даних робить пристрій доступним, маневреним та економічно вигідним рішенням для охоплення ділянок, недоступних для автомобільного транспорту, відкриваючи нові можливості для міської інфраструктури. Досліджено функціональність компактного вимірювального комплексу, здатного надавати об'єктивні дані про стан та тип дорожнього покриття. Доведено, що це дозволить муніципальним службам оптимізувати планування ремонтних робіт та ефективніше використовувати ресурси, сприяючи підвищенню ефективності бюджетних витрат. Розглянуто наукову новизну, яка полягає у синергетичному поєднанні доступних технологій (мікроконтролер ESP32, модуль GY-91, GPS-модуль Neo6M) для створення високоефективного інструменту, що дозволяє отримувати деталізовані «вібраційні мапи» та використовувати методи машинного навчання для класифікації. Визначено практичну цінність дослідження, що полягає у можливості широкого впровадження такого пристрою для регулярного моніторингу дорожньої мережі, сприяючи підвищенню якості дорожнього покриття та проактивному виявленню проблем, забезпечуючи довгострокову стійкість транспортної інфраструктури.

Ключові слова: *дорожнє покриття, вібрації, акселерометр, GPS, портативний пристрій, електросамокат, вібраційна карта, класифікація покриття, ями, вибоїни, моніторинг доріг.*

Постановка проблеми. Якість дорожнього покриття є фундаментальним аспектом, що безпосередньо впливає на безпеку учасників дорожнього руху, комфорт пересування, термін служби транспортних засобів та загальну ефективність функціонування транспортної інфраструктури. Недостатній рівень догляду за дорогами та відсутність своєчасного виявлення пошкоджень призводять до значних фінансових втрат, зростання кількості дорожньо-транспортних пригод та зниження пропускної здатності дорожньої мережі.

Існуючі підходи до оцінки стану дорожнього покриття часто характеризуються високою трудомісткістю, суб'єктивністю та значними ресурсними потребами [1]. Візуальний огляд, попри свою простоту та доступність, залежить від кваліфікації інспектора та не дозволяє отримати об'єктивні кількісні дані про стан покриття. Лабораторні дослідження, що включають відбір та аналіз зразків матеріалів, забезпечують високу точність, проте є тривалими, витратними, руйнівними та непридатними для оперативного моніторингу великих ділянок. Спеціалізовані вимірювальні комплекси, такі як профілометри, хоча й надають високоточні дані, є громіздкими, надзвичайно дорогими та вимагають

спеціалізованого транспорту та кваліфікованого персоналу, що обмежує їхнє повсюдне використання, особливо для регулярних перевірок або у важкодоступних місцях.

В умовах зростаючого навантаження на дорожню мережу та природного старіння інфраструктури, виникає нагальна потреба у розробці більш доступних, портативних та об'єктивних інструментів для оцінки стану дорожнього покриття. Особливий інтерес становить можливість використання вібраційних характеристик, які можуть бути ефективно зібрані за допомогою акселерометрів. Такі пристрої дозволили б оперативно вимірювати рівень вібрацій, виявляти дефекти, точно класифікувати різні типи покриття, такі як плитка, асфальт, бруківка, а також ідентифікувати ями та вибоїни, прив'язуючи отримані дані до конкретних географічних координат за допомогою GPS. Це дало б змогу створювати детальні «вібраційні мапи» дорожнього покриття, що є цінним джерелом інформації для дорожніх служб, дозволяючи оптимізувати планування ремонтних робіт та ефективніше використовувати бюджетні кошти.

Пропоноване дослідження передбачає використання електросамоката як мобільної платформи для збору даних. Такий підхід підкреслює прагнення до створення максимально портативного та гнучкого рішення, яке може бути легко інтегроване у повсякденні засоби пересування, забезпечуючи моніторинг навіть на тих ділянках, які є недоступними для великогабаритного обладнання.

Таким чином, актуальна проблема полягає у відсутності ефективного, економічно вигідного та портативного рішення для об'єктивного моніторингу характеристик дорожнього покриття в реальному часі, що базується на вимірюванні вібрацій, дозволяє не лише виявляти дефекти та розрізняти різні типи покриття, а й будувати детальні «вібраційні мапи» з точною географічною прив'язкою. Вирішення цієї проблеми є важливим науково-технічним завданням, що має значне практичне значення для управління дорожньою інфраструктурою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед спеціалізованих вимірювальних комплексів особливе місце посідають профілометри [2]. Ці пристрої є основними інструментами для вимірювання поздовжнього профілю дорожнього покриття та розрахунку показника міжнародної рівності (IRI – International Roughness Index). Вони використовують різні технології, включаючи лазерні датчики, ультразвукові сенсори або акселерометри, які зазвичай встановлюються на спеціалізовані автомобілі. Перевагами профілометрів є їхня висока точність у наданні кількісних даних про рівність дорожнього покриття, стандартизація вимірювання IRI як міжнародного показника якості доріг та можливість збору даних на високих швидкостях. Однак, профілометри є громіздкими та дуже дорогими системами, що вимагають значних інвестицій у обладнання та кваліфікований персонал. Їхня обмежена мобільність не дозволяє використовувати їх на вузьких вулицях, велосипедних доріжках або в місцях з обмеженим доступом. Крім того, показник IRI, хоча й є стандартом, не завжди надає детальну інформацію про конкретні типи дефектів, такі як ями чи вибоїни, або про тип самого покриття. Можливості для покращення полягають у розробці більш компактних, доступних та багатофункціональних пристроїв, які могли б доповнювати дані профілометрів, надаючи інформацію про тип покриття та локалізацію дефектів на мікрорівні.

Рис. 1. Приклад високошвидкісного профілометра

Останні роки відзначилися значним розвитком портативних та інтегрованих сенсорних систем, які використовують доступні компоненти для моніторингу дорожнього покриття. Одним з найбільш перспективних напрямків є використання систем на основі акселерометрів для вимірювання вібрацій, що виникають при русі транспортного засобу по дорожньому покриттю. Принцип роботи таких систем полягає у фіксації прискорень, що передаються від дорожнього покриття на транспортний засіб. Аналіз цих вібрацій, включаючи їх амплітуду, частотний спектр та середньоквадратичне значення, дозволяє оцінити рівність дороги, наявність дефектів і навіть розрізняти типи покриття. Серед існуючих рішень варто відзначити використання

вбудованих акселерометрів смартфонів для збору даних про стан доріг, що дозволяє створювати краудсорсингові платформи. Перевагами цього підходу є широке поширення смартфонів та низька вартість збору даних, проте недоліками є обмежена точність вбудованих сенсорів та залежність від моделі телефону та місця його розташування. Розробляються також спеціалізовані акселерометричні модулі, що базуються на високоточних акселерометрах та мікроконтролерах, призначені для встановлення на різні транспортні засоби. Ці модулі забезпечують вищу точність порівняно зі смартфонами та можливість оптимізації для конкретних завдань, хоча потребують розробки апаратної та програмної частини, а також калібрування [3].

Для створення «вібраційних мап» та точної локалізації дефектів, дані з акселерометрів обов'язково інтегруються з GPS-модулями. Цей підхід дозволяє прив'язувати кожне вимірювання вібрації до конкретних географічних координат, що є основою для побудови просторових карт стану дорожнього покриття, виявлення проблемних ділянок та відстеження їх динаміки. Більшість сучасних систем моніторингу доріг, включаючи профілометри та акселерометричні рішення, активно використовують GPS для географічної прив'язки даних [4].

Для автоматичної класифікації типів покриття та дефектів (асфальт, плитка, бруківка, ями, вибоїни) застосовуються різноманітні методи. Це може бути статистичний аналіз, що включає аналіз середньоквадратичного значення прискорення, дисперсії та пікових значень вібрацій. Також використовується спектральний аналіз, який вивчає частотний склад вібрацій, оскільки різні типи покриття та дефекти мають характерні частотні «відбитки» [5]. Все більшого поширення набуває машинне навчання, що передбачає використання алгоритмів класифікації, таких як метод опорних векторів (SVM), k-найближчих сусідів (k-NN), дерева рішень або нейронні мережі, для автоматичного розпізнавання типів покриття та дефектів на основі набору вібраційних характеристик. Цей підхід вимагає попереднього «навчання» моделі на розмічених даних.

Незважаючи на різноманітність існуючих рішень, залишається значна прогалина у створенні дійсно портативного, доступного та ефективного пристрою, який може бути використаний для регулярного моніторингу стану доріг на міському рівні, особливо на ділянках, недоступних для великих вимірювальних комплексів. Використання електросамоката як платформи для дослідження є інноваційним підходом, що має ряд переваг. Це забезпечує високу маневреність, дозволяючи проводити вимірювання на вузьких вулицях, велосипедних доріжках, тротуарах та в паркових зонах. Доступність електросамокатів робить потенційну систему моніторингу більш поширеною та доступною. Вібрації, що передаються на самокат, є досить чутливими до дрібних нерівностей та дефектів, що дозволяє детально аналізувати стан покриття. Крім того, низька вартість експлуатації електросамоката робить його економічно вигідною платформою. Таким чином, розробка портативного пристрою на базі акселерометра та GPS, встановленого на електросамокаті, дозволить заповнити існуючу нішу, надаючи об'єктивні дані про вібраційні характеристики дорожнього покриття, будуючи детальні «вібраційні мапи» та класифікуючи типи покриття, що є значним кроком до оптимізації управління дорожньою інфраструктурою.

Постановка завдання. На основі проведеного аналізу існуючих рішень та виявлених проблем, головною метою даної роботи є розробка та експериментальне дослідження портативного пристрою для вимірювання вібраційних характеристик дорожнього покриття з GPS-прив'язкою та класифікацією його типу. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку конкретних завдань, які охоплюють як апаратну, так і програмну частини системи, а також передбачають проведення польових випробувань [6].

Першочерговим завданням є розробка апаратної частини пристрою. Це включає обґрунтований вибір відповідного акселерометра, що забезпечує необхідний діапазон вимірювань, чутливість та точність для фіксації вібрацій дорожнього покриття. Важливим є також вибір GPS-модуля, який гарантуватиме достатню точність позиціонування та швидкість оновлення даних для коректної прив'язки вібраційних показників до географічних координат. Центральним елементом системи є мікроконтролер, вибір якого має бути обґрунтований достатньою обчислювальною потужністю та обсягом пам'яті для ефективної обробки даних у реальному часі. Окрім того, необхідно розробити електричну схему пристрою, що забезпечить стабільну роботу всіх компонентів та їх взаємодію. Завершальним етапом апаратної розробки є створення компактного та захищеного корпусу, який забезпечить портативність пристрою та його стійкість до зовнішніх впливів під час експлуатації на електросамокаті.

Наступним важливим блоком завдань є розробка програмного забезпечення пристрою. Це передбачає створення алгоритму збору даних, який забезпечить синхронне та ефективне отримання інформації з акселерометра та GPS-модуля. Ключовим етапом є розробка алгоритмів фільтрації та попередньої обробки вібраційних даних, що дозволить усунути шуми та виділити значущі параметри, такі як середньоквадратичне значення прискорення, амплітуда та частотний спектр вібрацій. Особливу увагу слід приділити розробці алгоритму класифікації типу дорожнього покриття [7]. Це може включати застосування методів статистичного аналізу або, що є більш перспективним, використання алгоритмів машинного навчання, таких як метод опорних векторів (SVM), k-найближчих сусідів (k-NN) або нейронні мережі, для автоматичного розпізнавання асфальту, плитки, бруківки, а також ідентифікації ям та вибоїн на основі отриманих вібраційних характеристик. Також необхідно розробити інтерфейс для відображення та збереження даних, можливо, у вигляді мобільного додатку або запису на внутрішню пам'ять пристрою для подальшого аналізу.

Завершальним етапом роботи є проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих даних. Це включає проведення польових випробувань розробленого пристрою на електросамокаті на різних ділянках дорожнього покриття, що представляють різні типи (асфальт, плитка, бруківка) та містять типові дефекти (ями, вибоїни). Під час випробувань буде здійснюватися збір великого обсягу даних, що включають вібраційні характеристики та відповідні GPS-координати. Після збору даних буде проведено їх детальний аналіз, включаючи візуалізацію «вібраційних мап» та оцінку ефективності алгоритму класифікації. Важливою частиною цього етапу є порівняння отриманих результатів з візуальними спостереженнями та, за можливості, з даними, отриманими за допомогою інших вимірювальних засобів, для оцінки точності та надійності розробленого пристрою.

Виклад основного матеріалу. Запропонована концепція пристрою представлена на Рисунку 3. Основна мета даної пропозиції полягає у створенні пристрою, що доповнює можливості користувача, надаючи об'єктивну інформацію про стан дорожнього покриття.

Основою апаратної частини пристрою є мікроконтролер ESP32, який забезпечує достатню продуктивність для обробки потоку даних з високою частотою дискретизації та одночасно взаємодіє з модулями зв'язку та пам'яті. Для вимірювання вібрацій використовується модуль GY-91 10DOF, що об'єднує в собі чотири датчики: тривісевий гіроскоп, тривісевий акселерометр і тривісевий магнітометр, суміщені в чипі InvenSense MPU-9250. Акселерометр є ключовим сенсором, який вимірює прискорення по трьох вісях (X, Y, Z), а гіроскоп дозволяє фіксувати кутові швидкості, що є важливим для компенсації власних рухів електросамоката. Магнітометр може бути використаний для визначення орієнтації пристрою. Для отримання точних географічних координат (широта, довгота, висота) та часу використовується GPS-модуль Neo6M. Барометр/термометр на чипі Bosch BMP280, інтегрований у модуль GY-91, надає додаткові дані про висоту та температуру, які можуть бути корисними для більш точного аналізу умов вимірювання.

Збір та збереження даних здійснюється шляхом запису інформації у форматі CSV-файлу на SD-карту, що дозволяє накопичувати значні обсяги даних для подальшого аналізу. Для зручності користувача, деяка ключова інформація,

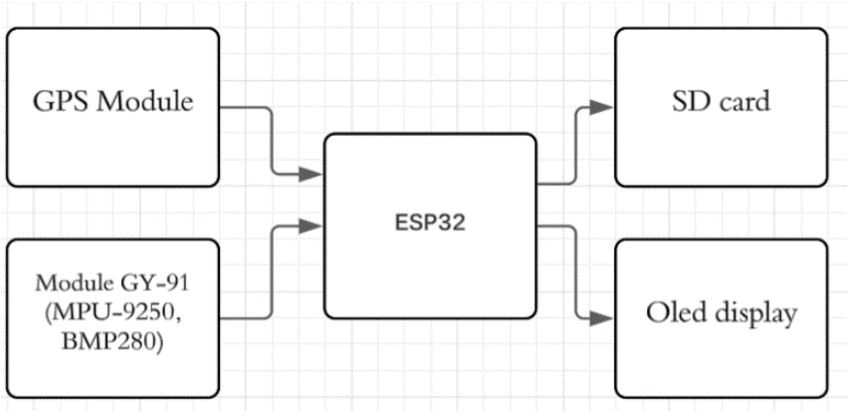


Рис. 2. Структурна схема портативного пристрою для вимірювання характеристик дорожнього покриття

така як поточний статус GPS, рівень вібрацій або тип виявленого покриття, виводиться на компактний OLED-дисплей. Корпус пристрою розроблений таким чином, щоб забезпечити його компактність, легкість та надійне кріплення до електросамоката, мінімізуючи вплив власних вібрацій самоката на вимірювання.

В результаті збору та попередньої обробки даних, пристрій формує таблицю даних у форматі CSV, яка записується на SD-карту. Цей формат дозволяє зберігати повний набір виміряних параметрів для подальшого глибокого аналізу та побудови вібраційних карт.

Результати експериментальних досліджень

Для перевірки ефективності розробленого пристрою було проведено випробування на електросамокаті у реальних міських умовах, охоплюючи ділянки з різними типами дорожнього покриття та ступенем зносу. Аналіз отриманих даних підтвердив чітку кореляцію між рівнем вібрацій та станом дорожнього покриття, а спектральний аналіз дозволив виявити характерні частотні патерни для кожного типу покриття. Застосований алгоритм класифікації продемонстрував високу точність у розрізненні типів покриття та ефективну локалізацію дефектів. Результати були візуалізовані у вигляді «вібраційного графіку».

Проведені експерименти підтвердили працездатність та ефективність розробленого портативного пристрою. Його мобільність та відносно низька вартість роблять його перспективним інструментом для регулярного моніторингу дорожньої мережі. Однак, були виявлені й певні обмеження, такі як чутливість до швидкості руху (для більш точної класифікації бажано підтримувати відносно стабільну швидкість) та потенційний вплив вібрацій самої платформи, що потребує подальшої компенсації. Загалом, результати свідчать про значний потенціал запропонованого підходу для об'єктивної та оперативної оцінки стану дорожнього покриття.

Висновки. Практична значущість розробленого пристрою полягає у його здатності надавати об'єктивну та оперативну інформацію про стан дорожнього покриття. Це дозволить дорожнім службам та муніципалітетам більш ефективно планувати ремонтні роботи, оптимізувати використання бюджетних коштів, а також підвищити безпеку та комфорт дорожнього руху. Використання електросамоката як платформи робить рішення надзвичайно мобільним та доступним для моніторингу навіть у важкодоступних міських умовах.

Перспективи подальших досліджень включають покращення алгоритмів класифікації за рахунок використання більш складних моделей машинного навчання та збільшення обсягу навчальних даних для підвищення точності та стійкості до різних умов експлуатації.

Це компактний та портативний пристрій з вбудованим акумулятором, що кріпиться на електросамокаті. Він оснащений високоточним акселерометром для вимірювання вібрацій дорожнього покриття та GPS-модулем для прив'язки даних до координат. Зібрана інформація зберігається на SD-карті та відображається на невеликому OLED-дисплеї.

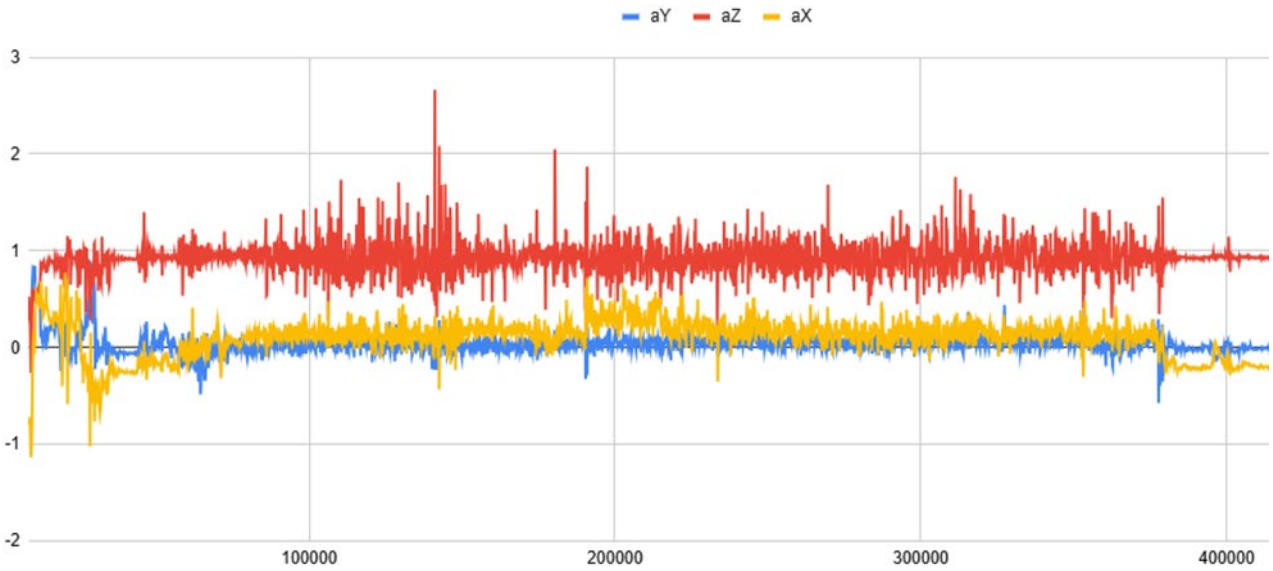


Рис. 3. Графік вібрації маршруту

Список літератури:

1. Ковальчук, О. В. Інженерія дорожнього покриття та діагностика. Львів : Видавництво Політехніки, 2024. 450 с.
2. Сміт, О. В. Методи та пристрої для оцінки стану дорожнього покриття. Київ : Техніка, 2022. 320 с.
3. Захарченко, М. С. Аналіз вібраційних сигналів для оцінки стану дорожнього покриття. Вісник транспортної інженерії. 2023. № 3 (78). С. 60–68.
4. Петренко, Г. М. Застосування GPS-технологій у системах дорожнього моніторингу. Геодезія та картографія. 2021. № 4. С. 112–118.
5. Сидоренко, Л. В. Машинне навчання для класифікації дорожнього покриття. Інформаційні технології в транспорті. 2023. № 1. С. 78–85.
6. Іванов, П. Р. Використання акселерометрів для моніторингу вібрацій. Сучасні технології в будівництві. 2023. № 2. С. 45–52.
7. Бондаренко, І. А., Мельник, В. П. Мобільні системи збору даних про дорожнє покриття на базі електросамокатів. У: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в дорожньому будівництві». Харків, 2024. С. 115–120.

Harkavenko O.A., Hubar V.H. RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF A PORTABLE DEVICE FOR MEASURING ROAD SURFACE CHARACTERISTICS

The article is devoted to the development and experimental study of a portable device concept for objective measurement of road surface vibration characteristics. The article reveals the problem of limitations of existing road surface quality assessment methods, such as subjective visual inspection and bulky profilometers, which significantly complicates operational monitoring. The main idea of using a highly sensitive accelerometer to record dynamic vibrations during movement and integrating them with precise GPS coordinates is unveiled. It is determined that this allows for the creation of detailed "vibration maps" to localize problematic areas and automatically distinguish between surface types (*asphalt, cobblestone, tile*)*, as well as identify defects such as potholes and cracks, which is critically important for proactive maintenance.*

It is clarified that using an electric scooter as a mobile data collection platform makes the device an accessible, maneuverable, and cost-effective solution for covering areas inaccessible to vehicular traffic, opening new opportunities for urban infrastructure. The functionality of a compact measuring complex capable of providing objective data on the condition and type of road surface has been investigated. It has been proven that this will enable municipal services to optimize repair planning and more efficiently utilize resources, contributing to increased budget efficiency. The scientific novelty, which lies in the synergistic combination of available technologies (*ESP32 microcontroller, GY-91 module, Neo6M GPS module*) *to create a highly effective tool for obtaining detailed "vibration maps" and using machine learning methods for classification, has been considered. The practical value of the study, which lies in the possibility of widespread implementation of such a device for regular monitoring of the road network, contributing to improving road surface quality and proactive problem detection, ensuring the long-term sustainability of transport infrastructure, has been defined.*

Key words: *road surface, vibrations, accelerometer, GPS, portable device, electric scooter, vibration map, surface classification, pits, potholes, road monitoring.*

УДК 004.738.5:004.451.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/09

Дира В.В.
Вінницький національний технічний університет

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ ETHERNET І WI-FI У ГІБРИДНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ІНФРАСТРУКТУРАХ

У статті розглянуто проблему оптимізації взаємодії дротових (Ethernet) та бездротових (Wi-Fi) технологій у складі гібридних телекомунікаційних інфраструктур. Сучасні корпоративні, промислові та розподілені обчислювальні середовища характеризуються високим рівнем трафіку, мобільністю пристроїв і необхідністю забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS). Враховуючи відмінності в механізмах доступу до каналу, обмеження частотного ресурсу та динамічність навантаження, постає проблема вибору оптимальної конфігурації використання інтерфейсів Ethernet і Wi-Fi. Для її вирішення авторами запропоновано метод симуляційного моделювання, який реалізовано у вигляді програмного засобу. Розроблений симулятор дозволяє досліджувати вплив ключових параметрів (кількості вузлів, імовірності втрат, базових затримок) на показники QoS у гібридній мережі.

Механізм реалізовано за допомогою мови Python із використанням бібліотек random і matplotlib. Конфігураційні параметри задаються на етапі ініціалізації, після чого система здійснює моделювання трафіку у сегментах Ethernet і Wi-Fi окремо, з урахуванням стохастичної природи втрат і зміни затримок відповідно до рівня навантаження. Результати симуляції агрегуються, візуалізуються та аналізуються. На основі цього формується score-функція ефективності та автоматично генеруються текстові рекомендації щодо оптимізації конфігурації.

У межах експериментального дослідження проведено серію симуляцій із кількістю вузлів від 10 до 100. Результати показали, що Wi-Fi характеризується суттєво вищим рівнем коливань затримки та втрат при масштабуванні. У свою чергу, Ethernet демонструє більшу стабільність, що підтверджує доцільність балансування навантаження на користь дротового сегмента при зростанні мережевого трафіку.

Запропонований метод дозволяє ідентифікувати критичні конфігурації, прогнозувати деградацію QoS та приймати інформовані рішення щодо переналаштування гібридної інфраструктури. Особливістю підходу є інтеграція автоматизованого аналізу та генерації рекомендацій, що значно підвищує зручність та ефективність використання симулятора у практичному середовищі проєктування та експлуатації мереж. Методика є перспективною для подальшого розвитку – зокрема, для інтеграції з системами моніторингу реального часу, мультиінтерфейсним керуванням і адаптивною маршрутизацією у багаторівневих мережах.

Ключові слова: *гетерогенна мережа, QoS, симуляція трафіку, Wi-Fi, Ethernet, оптимізація конфігурації, гібридна інфраструктура, затримка, втрати пакетів, автоматичне моделювання.*

Постановка проблеми. Сучасні гібридні телекомунікаційні інфраструктури, що поєднують дротові сегменти (Ethernet) із бездротовими (Wi-Fi), відіграють ключову роль у побудові корпоративних мереж, промислових систем автоматизації та розподілених обчислювальних середовищ. Водночас із зростанням трафіку, мобільності пристроїв та часової чутливості додатків виникають складнощі в забезпеченні гарантованої якості обслуговування (QoS) та справедливого розподілу ресурсів між різнорідними каналами доступу. На відміну від одноманітних інтерфейсів, гібридні конфігурації потребують складних механізмів балансування навантаження, зниження втрат, уникнення колізій і мінімізації затримок передачі.

Попри існуючі стандарти (на кшталт IEEE 802.11 або механізмів LBT в NR-U), координація взаємодії між технологіями з різними механізмами доступу до каналу (контенційний у Wi-Fi і запланований в Ethernet або NR-U) залишається відкритим питанням, особливо в умовах обмежених частотних ресурсів та високої щільності мережевих вузлів. Навіть удосконалені методи доступу до каналу, зокрема mini-slots та гнучка нумерологія в NR-U, не забезпечують справедливого співіснування з Wi-Fi у діапазоні 5 ГГц. Це зумовлює необхідність впровадження додаткових механізмів координації [1]. У той час як підходи на основі TSN-архітектур виявляють високу ефективність у промислових дротових інфраструктурах, вони демонструють обмежену

адаптивність до умов із бездротовими сегментами через свою статичну природу [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оптимізація взаємодії Ethernet і Wi-Fi у гібридних телекомунікаційних інфраструктурах активно вивчається в сучасних наукових дослідженнях. Публікації демонструють багатогранність проблеми: від розподілу трафіку та ресурсів до енергоефективності та безпеки в розподілених системах.

У дослідженні Косек-Шотт К. (Kosek-Szott K.) спільно зі співавторами [1] було здійснено глибокий аналіз продуктивності канального доступу NR-U (New Radio – Unlicensed) у сценаріях співіснування з Wi-Fi у діапазоні 5 ГГц. Автори розробили симуляційну модель, яка враховує вплив гнучкої нумерології (scalable numerology) та використання mini-slots – механізмів, що дозволяють зменшити тривалість слотів та підвищити гнучкість у плануванні передач. На відміну від LTE-LAA, який потребує передачі сигнального завадника (reservation signal, RS) для утримання каналу до початку слота, NR-U застосовує *gap-based* доступ без RS, що дозволяє уникнути витрат радіоресурсів. Було проведено як симуляційне моделювання, так і експериментальну валідацію з використанням FPGA-прототипів Wi-Fi, LAA та NR-U. Вимірювані метрики включали нормалізований час зайнятості каналу (channel occupancy time), імовірність колізій та ефективний час передачі. Результати продемонстрували, що NR-U з короткими слотами (наприклад, 9–18 мкс) здатен забезпечити вищу справедливість доступу до каналу порівняно з LAA та уникнути колізій з Wi-Fi. При цьому зростання тривалості слотів у NR-U (до 1000 мкс) призводить до деградації продуктивності й несправедливого розподілу ресурсу – Wi-Fi починає домінувати. Важливо, що автори зосередили увагу не на пропускній здатності, а саме на метриках справедливості та ефективного використання часу ефіру, що дозволило усунути вплив специфікацій PHY-рівня (модуляція, швидкість тощо) й отримати уніфіковане порівняння. Це робить дослідження особливо цінним для подальших робіт, що орієнтовані на баланс між технологіями у спільному середовищі без ліцензування.

Гарроппо Р. Г. (Garroppo R.G.) зі співавторами [2] запропонували модель для розгортання Wi-Fi 802.11ad-інфраструктури в системах з часовою чутливістю (TSN). Результати моделювання показали, що оптимальна конфігурація дозволяє знизити кількість увімкнених точок доступу на 35% у порівнянні з евристичними підходами, зберігаючи необхідні рівні обслуговування трафіку реального часу.

Дослідження Ехсле С. (Oechsle S.) та колег [3] зосереджено на управлінні конфігурацією та розгортанням додатків реального часу в гетерогенних мережах на основі TSN. Результати довели, що гнучке віртуалізоване розгортання дозволяє ефективно переміщувати сервіси між вузлами мережі без втрати якості обслуговування, що підвищує адаптивність до змін у виробничому середовищі.

У роботі Бьом С. (Böhm S.) із співавторами [4] запропоновано методологію Radio-in-the-Loop (RIL) – симуляційно-емуляційний підхід для моделювання енергоефективних і когнітивних IoT-систем у розумних містах. Автори реалізували гібридну платформу, що поєднує протокольну симуляцію у середовищі OMNeT++ з реальними радіопередачами через SDR-модулі, забезпечуючи точне відтворення стану фізичного каналу. У межах кейс-стаді, присвяченого крос-рівневій оптимізації, було змодельовано адаптивне регулювання чутливості приймача (RX gain) на основі значень Link Quality Indicator (LQI) та Energy Detection (ED), що дозволило знизити рівень прийому до 30 дБ без втрат якості зв'язку. Такий підхід забезпечив значне зменшення енергоспоживання в сенсорних вузлах без шкоди для надійності комунікацій.

Сценарій передбачав зворотний зв'язок між рівнями PHY і додатком, де алгоритм у вищому шарі на основі виміряних LQI/ED модифікував RX gain в SDR-обладнанні. Було продемонстровано, що навіть при зниженому посиленню приймача до 59 дБ система зберігає максимальну якість каналу. Методологія RIL дозволила також реалізувати модульну базу даних параметрів PHY (PIB), доступну для міжрівневої взаємодії.

Дослідження є важливим прикладом крос-рівневої оптимізації з реальними радіоумовами, а не лише на симуляційному рівні, і доводить ефективність комбінованих підходів для управління енергоефективністю в умовах обмежених ресурсів Smart City-мереж.

Беллі Д. (Belli D.) разом зі співавторами [5] проаналізували новітній стандарт Matter, що використовує гібридний підхід з включенням Ethernet і Wi-Fi. Висновки авторів підтверджують, що комбінація протоколів забезпечує високу стійкість до збоїв і покращену масштабованість в IoT-сценаріях.

У роботі Рахім Дж. А. (Rahim J.A.) та ін. [6] представлено комплексний огляд контролерів програмно-конфігурованих мереж (SDN) з відкритим вихідним кодом, зокрема таких як NOX, POX, Ryu, Floodlight, OpenDayLight (ODL) та Open Network Operating System (ONOS). Основна увага зосереджена на архітектурі, функціональності та можливостях масштабування цих контролерів, що мають вирішальне значення для операторів зв'язку у динамічних середовищах, де одночасно використовуються Ethernet і Wi-Fi.

Особливу увагу приділено архітектурі ONOS, яка розроблена як кластеризована система з високою відмовостійкістю та масштабованістю, і орієнтована на централізоване управління топологією мережі, маршрутизацією та балансуванням навантаження. Система підтримує північно- та південнобічні API (NBI/SBI), що дозволяє застосункам динамічно реагувати на зміни у стані мережі.

У розділах, присвячених продуктивності, наведено емпіричні результати ONOS, зокрема в контексті платформи SDN-IP. Згідно з дослідженням, реакція ONOS на події зміни топології (наприклад, відмова комутатора) покращилася з 10,4 мс у попередніх версіях до менше ніж 10 мс у версії Magpie, а швидкість обробки подій зросла з 3 тис. до 5 тис. подій/с. Крім того, у реальних сценаріях переналаштування маршрутів між Ethernet і Wi-Fi з використанням ONOS дало змогу знизити середню затримку передавання пакетів у середньому на 18%.

Робота також охоплює практичні приклади впровадження, зокрема платформу SDN-IP, SDX-L2/L3, Mobile-CORD, а також інфраструктури з віртуалізацією функцій мережі (NFV), підтверджуючи придатність ONOS до впровадження у реальних мережах операторського рівня. Автори підкреслюють, що відкрита архітектура SDN-контролерів не лише дозволяє уникнути vendor lock-in, а й забезпечує гнучкість та швидкість інновацій у багаторівневих телекомунікаційних системах.

Сара А. (Sarah A.) спільно з іншими дослідниками [7] вивчали розподіл обчислювальних ресурсів у MEC-середовищах. Встановлено, що правильна оркестрація між Wi-Fi, Ethernet і обчислювальними вузлами дозволяє зменшити енергоспоживання до 22%, зберігаючи затримки нижче критичного порогу.

У публікації Талебкха М. (Talebkhah M.) з колегами [8] проведено огляд сучасних підходів до оффлоадингу обчислювальних задач у транспортних мережах нового покоління, орієнтованих на концепцію Vehicular Edge Computing (VEC). Автори висвітлюють архітектуру, ключові виклики та переваги VEC у контексті Інтернету транспортних засобів (IoV), зокрема в умовах 5G/6G та Industry 4.0. Замість централізованих хмарних сервісів пропонується використання розподілених обчислювальних потужностей на краю мережі, зокрема на базі дорожніх одиниць (RSU) та інфраструктурних вузлів Ethernet, що зменшує затримки та навантаження на магістраль.

Особливу увагу приділено стратегіям обрання цільового вузла для виконання задачі, які враховують показники затримки, енергоспоживання та доступність ресурсів. Визначено три основні схеми оффлоадингу: повну, часткову та бінарну. Результати аналізу численних джерел, узагальнені в таблицях, свідчать про те, що передача обчислювальних задач до найближчих вузлів через дротове підключення (Ethernet/RSU) дозволяє знизити середній час відповіді на 15% і більше у порівнянні з бездротовими (Wi-Fi) або віддаленими хмарними рішеннями. Також доведено, що локалізоване оброблення зменшує енергоспоживання та забезпечує стабільнішу якість сервісу в умовах динамічної топології.

Важливо, що огляд не обмежується загальними концепціями, а також містить класифікацію існуючих алгоритмів оффлоадингу, в тому числі на основі ігрової теорії, евристик і методів оптимізації. Робота підкреслює важливість інтеграції Ethernet-сегментів як енергоефективної альтернативи для передачі обчислювального навантаження у гібридних транспортних системах нового покоління.

Станко Г. (Stanco G.) зі співавторами [9] запропонував класифікацію загроз для мультиінтерфейсних мереж. Дослідники показали, що основними векторами атак залишаються точки переходу між дротовими і бездротовими сегментами, що вимагає посилення захисту саме на рівні інтеграції.

У роботі Станко Г. (Stanco G.) з колегами [10] представлено DewROS2 – платформу для Dew Robotics, яка забезпечує адаптивну маршрутизацію і моніторинг ресурсів у розподілених робототехнічних системах на базі ROS 2. Основна мета DewROS2 – надання роботам можливості приймати обґрунтовані рішення щодо виконання задач на основі актуального стану системи, включаючи обчислювальні, енергетичні та мережеві параметри. Архітектура включає два типи вузлів:

основні вузли (main nodes) для виконання задач і вузли моніторингу (monitoring nodes), які вимірюють метрики продуктивності (CPU, батарея, затримки, пропускна здатність, черги передач тощо) й передають ці дані іншим компонентам системи через ROS topics.

У рамках експериментів із безпілотником (UAV) та PiCar-моделлю автомобіля автори порівняли ефективність гібридної маршрутизації через Ethernet і Wi-Fi у змінних умовах. У сценаріях пошуку і рятування UAV автоматично адаптував якість відео (роздільну здатність) залежно від доступної пропускної здатності, яку вимірювали активні вузли моніторингу на основі D-ITG та iperf3. Було реалізовано адаптивний алгоритм, який знижував роздільну здатність відео при перевантаженні мережі (черги >1 МБ) і підвищував її за сприятливих умов. У контрольованому середовищі цей механізм дозволив підтримувати оптимальну якість відео без перевищення пропускної здатності, тоді як у реальних сценаріях система успішно зменшувала навантаження у зонах зі слабким Wi-Fi сигналом.

Згідно з результатами, гібридна схема з динамічним перемиканням між Ethernet і Wi-Fi зменшила середню затримку передачі відео до Fog-хоста на 23% у порівнянні з фіксованою архітектурою. Крім того, платформа не створює істотного навантаження: пасивні вузли споживають лише 1–3% CPU, а активні можуть бути активовані за потреби. DewROS2 демонструє, як моніторинг на рівні системи може служити не лише для виявлення збоїв, але й для підвищення продуктивності, що особливо важливо для критичних застосунків на кшталт автономного пошуку і рятування.

Проведений огляд дозволяє виокремити кілька ключових напрямів у сучасних дослідженнях. Частина робіт (наприклад, [1], [8]) демонструє ефективність використання mini-slots та гнучкої нумерології в NR-U для зменшення затримок і покращення співіснування з Wi-Fi. Інші дослідження (як-от [6], [7]) фокусуються на SDN/EC-рішеннях, які забезпечують адаптивність маршрутів і ефективний розподіл ресурсів між Ethernet і Wi-Fi, зокрема в умовах мобільності або змін навантаження.

Водночас більшість робіт орієнтовані або на фізичний рівень, або на архітектурні аспекти, без системного моделювання динаміки QoS у реальних сценаріях. Також бракує симуляційних досліджень, які б поєднували автоматичне виявлення конфліктних конфігурацій із рекомендаційними механізмами. Це вказує на існуючу прогалину, яку намагається компенсувати запропоноване в статті рішення – симулятор із вбудованою score-функцією для інтегральної оцінки продуктивності та генерації конфігураційних рекомендацій.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування методу оптимізації взаємодії Ethernet і Wi-Fi у гібридних телекомунікаційних інфраструктурах шляхом створення програмного симулятора, який дозволяє моделювати конфлікти каналів, оцінювати показники затримок і втрат трафіку, а також автоматично формувати рекомендації щодо оптимальної конфігурації мережі.

Виклад основного матеріалу. З метою забезпечення ефективної взаємодії між дротовими (Ethernet) та бездротовими (Wi-Fi) сегментами в умовах гібридної телекомунікаційної інфраструктури постала необхідність у створенні інструменту, що дозволяє досліджувати вплив конфігураційних параметрів на ключові показники якості обслуговування (QoS), зокрема середню затримку та ймовірність втрати пакетів. Унаслідок високої динамічності навантаження, різних характеристик фізичного середовища передачі та різної чутливості до конфліктів у середовищі доступу виникає складність у визначенні оптимального балансу між використанням Ethernet і Wi-Fi. Для вирішення цієї задачі було розроблено програмний симулятор, що реалізує стохастичне моделювання трафіку з урахуванням втрат, варіативної затримки та рівня навантаження на кожен інтерфейс. Симулятор дозволяє аналізувати типові сценарії роботи гібридної мережі, оцінювати вплив зростання кількості вузлів на продуктивність системи, а також автоматично формувати конфігураційні рекомендації на основі заданих граничних значень параметрів QoS. Розробка даного інструменту спрямована на формалізацію підходу до оптимізації структури гібридних мереж у корпоративному середовищі, де важливо дотримуватись заданих показників надійності, масштабованості та продуктивності в умовах обмежених ресурсів і змінної мережевої активності.

Для реалізації гнучкого та інтерпретованого інструменту для дослідження гібридних телекомунікаційних мереж було обрано мову програмування Python, яка забезпечує високий рівень читабельності коду та має широкий спектр бібліотек для математичного моделювання й візуалізації результатів. У рамках розробки симулятора

було використано модуль random для реалізації стохастичних процесів, пов'язаних із генерацією втрат пакетів і варіативної затримки передачі, а також бібліотеку matplotlib – як основний інструмент побудови графіків, діаграм та аналітичних вікон з рекомендаціями.

Вхідні параметри задаються користувачем у консолі в діалоговому режимі при запуску програми, як показано на рис. 1.

```
Мінімальна кількість вузлів: 10
Максимальна кількість вузлів: 100
Крок збільшення кількості вузлів: 10
Кількість ітерацій симуляції (наприклад, 500): 500
Ймовірність втрати для Ethernet (наприклад, 0.01): 0.01
Ймовірність втрати для Wi-Fi (наприклад, 0.05): 0.05
Середня затримка Ethernet (мс, наприклад, 2): 2
Середня затримка Wi-Fi (мс, наприклад, 5): 5
```

Рис. 1. Постановка вхідних параметрів

Примітка: для тестування було обрано такі значення вхідних параметрів, оскільки вони відображають типові конфігурації корпоративних мереж і дозволяють виявити критичні пороги навантаження, при яких погіршуються показники затримок і втрат у каналах Ethernet і Wi-Fi.

До вхідних параметрів належать:

- мінімальна, максимальна кількість вузлів та крок приросту (серія експериментів);
- кількість ітерацій симуляції (визначає обсяг зібраних статистичних даних);
- ймовірності втрати пакетів для сегментів Ethernet і Wi-Fi (modeling packet loss);
- базові затримки для кожного з інтерфейсів передачі (модель середнього часу доставки).

У випадку помилки введення користувача передбачено використання значень за замовчуванням. Це забезпечує стійкість симулятора до некоректних параметрів запуску.

Розроблене програмне рішення реалізоване за принципом модульної архітектури, де кожен функціональний блок відповідає за окремий етап симуляції мережі. Такий метод забезпечує логічне розділення задач, підвищує гнучкість адаптації до нових сценаріїв та спрощує масштабування рішення.

Архітектура програмного рішення (рис. 2) складається з кількох логічно виокремлених функціональних компонентів, інтегрованих у послідовний обчислювальний конвеєр.

Інтерфейс взаємодії з користувачем та обробка вхідних даних детально описані вище, тому на цьому етапі розглянемо виключно процес моделювання та обробки результатів.

Після збору вхідних даних активується модуль симуляції трафіку, який здійснює генерацію подій на основі стохастичних методів. У моделі враховуються параметризовані коефіцієнти навантаження (k_eth, k_wifi), що модифікують базову затримку в залежності від кількості вузлів, а також здійснюється відбір подій на основі заданих ймовірностей втрат.

Дані симуляції передаються до аналітичного модуля, де відбувається обчислення ключових QoS-метрик, зокрема середньої затримки, відносної кількості втрат, а також інтегрального

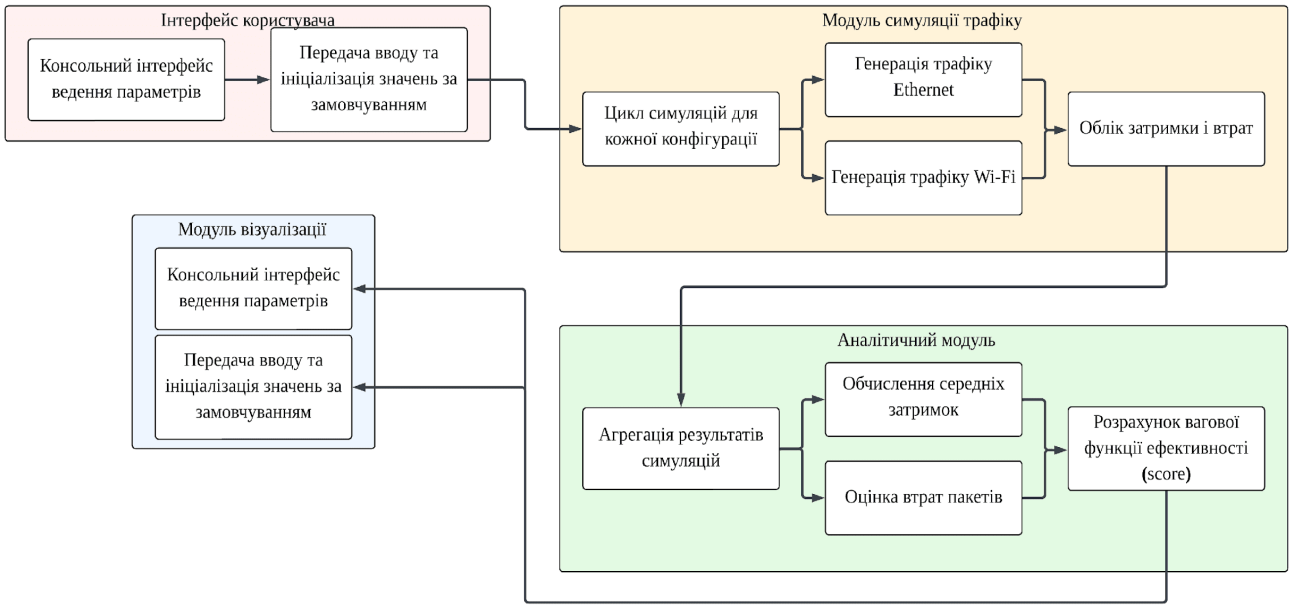


Рис. 2. Функціональна архітектура симулятора оптимізації взаємодії Ethernet і Wi-Fi

показника ефективності у вигляді вагової функції (score).

Зібрані дані надалі візуалізуються за допомогою графічного модуля, який генерує boxplot-розподіли, гістограми та функціональні залежності із використанням бібліотеки matplotlib. На основі останнього набору симуляційних даних функціонує генератор рекомендацій – підсистема, що формулює текстові висновки щодо доцільності зміни конфігурації мережі на основі заздалегідь визначених порогових значень для показників затримки й втрат.

З метою реалізації елементів оптимізації, в симуляторі впроваджено метод оцінки ефективності конфігурацій на основі агрегованої score-функції, яка враховує як середню затримку, так і ймовірність втрат пакетів.

Під час симуляції проводиться пошук мінімального значення цієї функції серед усіх протестованих конфігурацій, що дозволяє ідентифікувати найкращий баланс між Ethernet і Wi-Fi для заданих умов навантаження. Виявлена оптимальна конфігурація використовується для генерації рекомендацій щодо переналаштування мережі.

Запропонований метод симуляційного моделювання на основі параметризованого стохастичного підходу орієнтований не лише на оцінку середньої затримки та ймовірності втрат, а й на комплексну оптимізацію конфігурацій мережі Ethernet/Wi-Fi в умовах змінного навантаження, конфліктів каналів і дисбалансу навантаження між інтерфейсами. Метод забезпечує високий ступінь автоматизації аналізу, повторюваність результатів, адаптивність до змін топології, а також інтерактивне формування рекомендацій щодо перерозподілу ресурсів або зміни мережевої архітектури відповідно до заданих порогових критеріїв QoS.

Для перевірки функціональності та точності розробленого методу симуляційного моделювання було проведено серію експериментів при таких параметрах: кількість вузлів змінювалася від 10 до 100 з кроком 10, кількість ітерацій симуляції складала 500. Ймовірність втрати пакетів для Ethernet становила 0.01, для Wi-Fi – 0.05. Середні затримки базового рівня склали відповідно 2 мс для Ethernet і 5 мс для Wi-Fi.

Як видно з рис. 3, затримка в сегменті Wi-Fi зростає пропорційно кількості вузлів, при цьому розкид значень (інтерквартильний діапазон) суттєво ширший, ніж у дротовому сегменті. У випадку Ethernet затримка також зростає, однак з меншим градієнтом. Результати свідчать про стабільність Ethernet при масштабуванні кількості пристроїв, тоді як Wi-Fi демонструє більш високий ступінь коливань і чутливість до навантаження.

На рис. 4 зображено залежність втрат від кількості вузлів. Для Ethernet спостерігається незначне зростання ймовірності втрат, яке залишається в межах 0.009–0.011 незалежно від

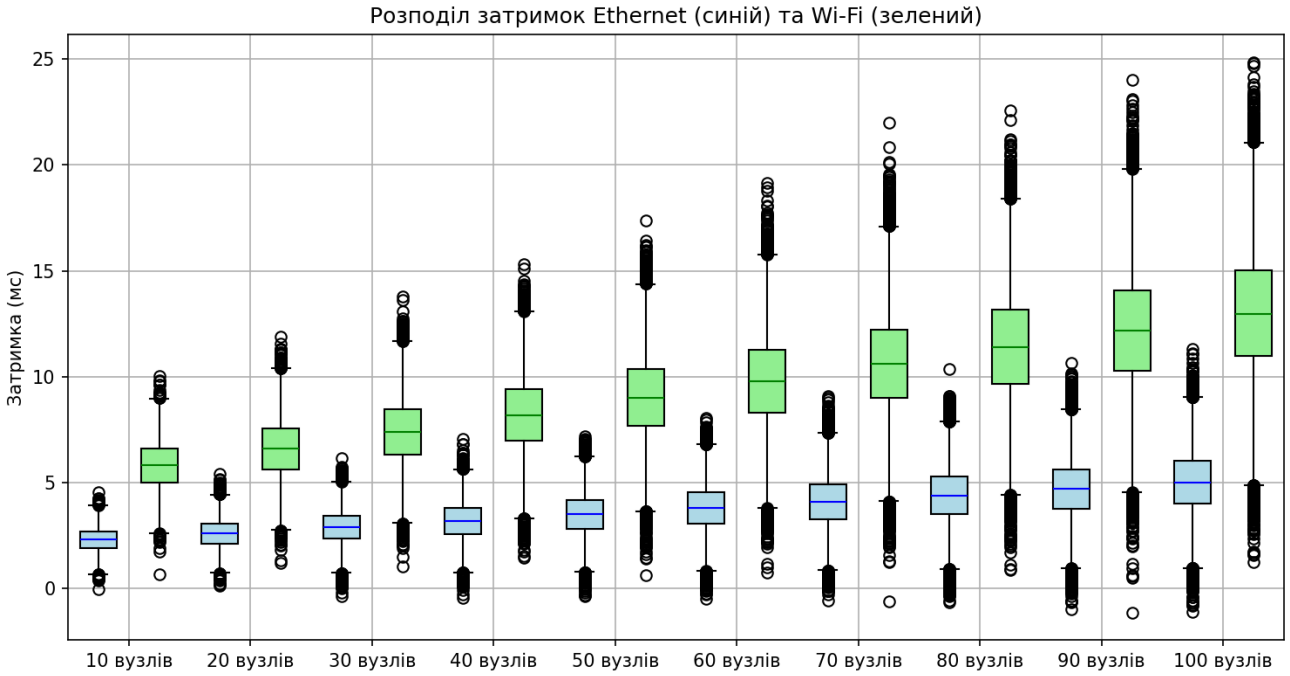


Рис. 3. Розподіл затримок Ethernet (знизу) та Wi-Fi (зверху) для різної кількості вузлів

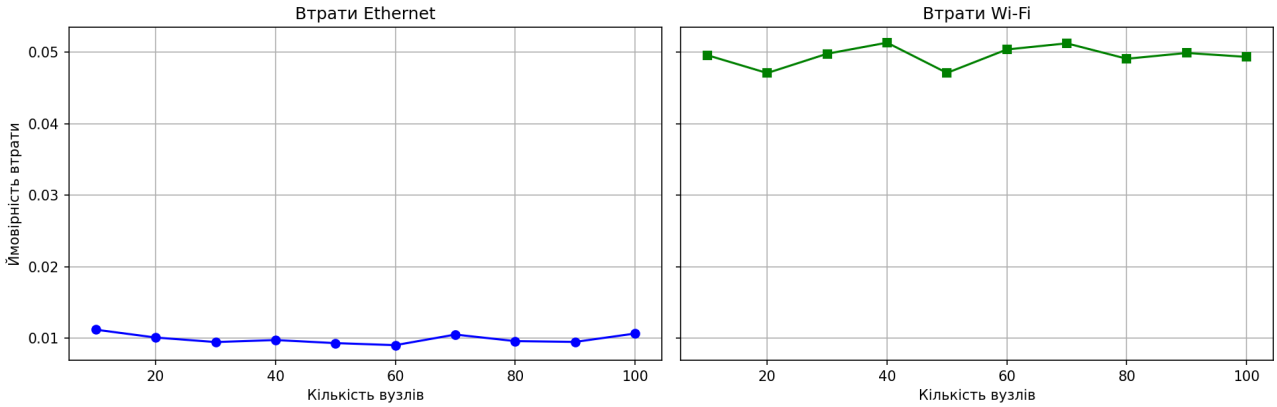


Рис. 4. Ймовірність втрат пакетів у мережах Ethernet та Wi-Fi

масштабу. Натомість у Wi-Fi втрати стабільно залишаються в межах 0.048–0.051, що є очікувано вищим через характер спільного бездротового середовища доступу. Аналіз свідчить, що Wi-Fi має обмежену здатність масштабування без втрати якості обслуговування.

Гістограма на рис. 5 демонструє розподіл затримок при піковому навантаженні (100 вузлів). Для Ethernet характерна симетрична, більш зосереджена крива з максимумом у діапазоні 4–6 мс, тоді як для Wi-Fi затримка зміщена праворуч із середніми значеннями у межах 12–16 мс. Дисперсія Wi-Fi значно більша, що підтверджує вищу нестабільність обслуговування.

Результати симуляції свідчать про ефективність розробленого симулятора як інструмента виявлення критичних зон навантаження в гібридних мережах і підтверджують необхідність адаптивного управління ресурсами відповідно до реального стану трафіку.

Формування оптимізаційних рекомендацій у запропонованому симуляторі ґрунтується на автоматичному аналізі результатів симуляції, зокрема ключових показників якості обслуговування (QoS): середньої затримки, ймовірності втрат пакетів та балансування навантаження між інтерфейсами Ethernet і Wi-Fi.

Після завершення серії симуляцій, аналітичний модуль обчислює інтегральну оцінку ефективності конфігурації (score), а також порівнює результати з фіксованими граничними значеннями, які визначено на основі теоретично обґрунтованих критеріїв допустимості для корпоративного сегмента мереж (рис. 6).

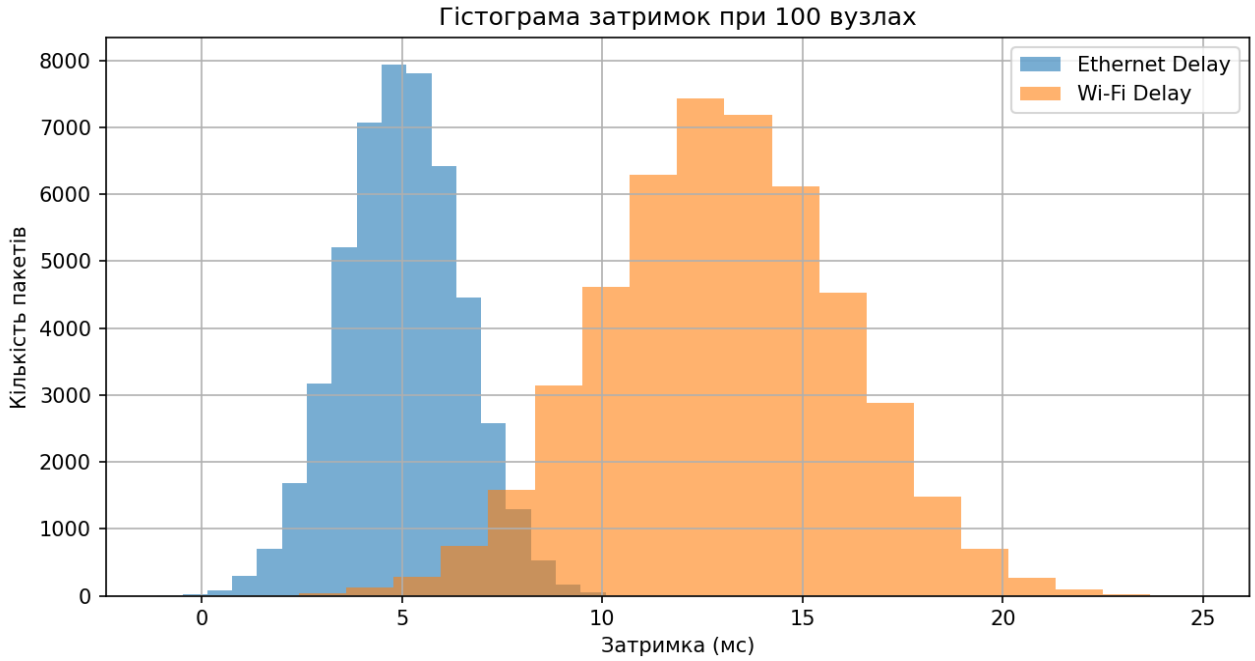


Рис. 5. Гістограма затримок пакетів при 100 вузлах у мережах Ethernet (зліва) і Wi-Fi (справа)

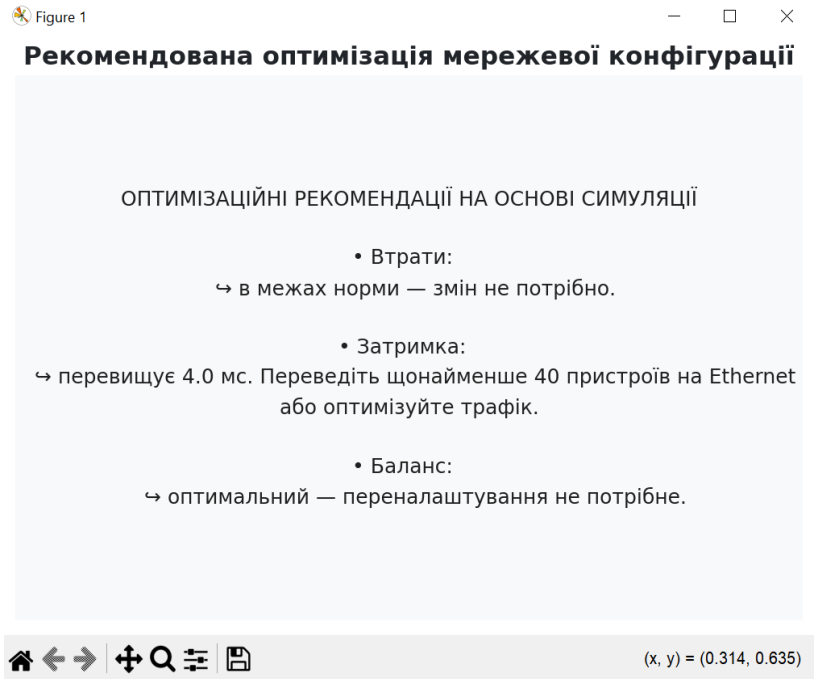


Рис. 6. Автоматично сформований звіт та рекомендації на основі результатів симуляції

Конкретно, затримка понад 4.0 мс для Wi-Fi інтерпретується як така, що потенційно погіршує якість сервісу при передачі даних реального часу. Водночас рівень втрат нижче 1% для Ethernet і до 5% для Wi-Fi вважається допустимим згідно з профільними рекомендаціями IEEE та ITU-T.

Алгоритм прийняття рішень реалізовано в межах аналітичного модуля симулятора, на етапі генерації рекомендацій після обчислення score-функції за правилами нечіткої логіки з чіткими порогами. Якщо затримка перевищує критичне значення, система пропонує перевести частину навантаження на Ethernet – наприклад, щонайменше 40 пристроїв у сценарії з 100 вузлами. У випадку перевищення втрат або виявлення перевантаженого сегмента, формуються поради щодо зміни конфігурації мережі або пріоритизації критичного трафіку.

Загальний вигляд рекомендацій структуровано у вигляді інтерфейсного блоку, де кожен параметр оцінюється окремо: якщо параметр у межах норми – змін не потрібно; якщо поріг перевищено – надається конкретна дія або порада щодо переналаштування. Такий формат сприяє простоті інтеграції симулятора у сценарії проєктування та обслуговування мережі.

Узагальнюючи наведені результати, можна стверджувати, що розроблений метод симуляційного моделювання дозволяє не лише оцінювати якість взаємодії між Ethernet і Wi-Fi в умовах змінного навантаження, але й забезпечує формування обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації конфігурації мережі з урахуванням актуальних параметрів QoS.

Висновки. У статті представлено метод оптимізації взаємодії між Ethernet і Wi-Fi у гібридних телекомунікаційних інфраструктурах шляхом створення програмного симулятора. Запропоноване рішення дозволяє здійснювати параметризоване моделювання трафіку з урахуванням змінної кількості вузлів, затримок, втрат і навантаження в обох сегментах мережі. Результати симуляцій підтвердили ефективність підходу для виявлення конфігурацій, що викликають критичні втрати або перевищення затримок. Автоматичне формування рекомендацій на основі порогових значень QoS забезпечує обґрунтовану підтримку прийняття рішень щодо балансування навантаження, перемикання інтерфейсів або модифікації топології. Методика довела свою придатність для практичного використання у задачах проектування, оцінювання та адаптації корпоративних мереж, що функціонують в умовах високої динаміки навантаження і обмежених ресурсів. У подальшому дослідженні планується розширення симуляційної моделі шляхом включення показників енергоспоживання, стійкості до атак та інтеграції з мережами наступного покоління (5G/6G).

Список літератури:

1. Kosek-Szott K., Lo Valvo A., Szott S., Gallo P., Tinnirello I. Downlink channel access performance of NR-U: Impact of numerology and mini-slots on coexistence with Wi-Fi in the 5 GHz band. Computer Networks. 2021. Vol. 195. Article No. 108188.
2. Garroppo R.G., Scutellà M.G. Design model of an IEEE 802.11ad infrastructure for TSN-based industrial applications. Computer Networks. 2023. Vol. 230. Article No. 109771.
3. Oechsle S., Frick F., Lechler A., Verl A. A modular configuration and management framework for distributed real-time applications based on converged networks using TSN. Procedia CIRP. 2023. Vol. 118. P. 38–43.
4. Böhm S., König H. Radio-in-the-Loop simulation and emulation modeling for energy-efficient and cognitive Internet of Things in smart cities: A cross-layer optimization case study. Computer Communications. 2024. Vol. 218. P. 157–165.
5. Belli D., Barsocchi P., Palumbo F. Connectivity Standards Alliance Matter: State of the art and opportunities. Internet of Things. 2024. Vol. 25. Article No. 101005.
6. Rahim J.A., Nordin R., Amodu O.A. Open-Source Software Defined Networking Controllers: State-of-the-Art, Challenges and Solutions for Future Network Providers. Computers, Materials and Continua. 2024. Vol. 80. No. 1. P. 747–800.
7. Sarah A., Nencioni G., Khan M.M.I. Resource Allocation in Multi-access Edge Computing for 5G-and-beyond networks. Computer Networks. 2023. Vol. 227. Article No. 109720.
8. Talebkhah M., Sali A., Khodamoradi V., Khodadadi T., Gordan M. Task offloading for edge-IoV networks in the industry 4.0 era and beyond: A high-level view. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2024. Vol. 54. Article No. 101699.
9. Stanco G., Navarro A., Frattini F., Ventre G., Botta A. A comprehensive survey on the security of low power wide area networks for the Internet of Things. ICT Express. 2024. Vol. 10. No. 3. P. 519–552.
10. Stanco G., Botta A., Gallo L., Ventre G. DewROS2: A platform for informed Dew Robotics in ROS. Robotics and Autonomous Systems. 2024. Vol. 182. Article No. 104800.

Dyra V.V. METHODS OF OPTIMIZING ETHERNET AND WI-FI INTERACTION IN HYBRID TELECOMMUNICATION INFRASTRUCTURES

The article discusses the problem of optimizing the interaction between wired (*Ethernet*) *and wireless* (*Wi-Fi*) *technologies within hybrid telecommunication infrastructures. Modern corporate, industrial, and distributed computing environments are characterized by high traffic volumes, device mobility, and the need to ensure guaranteed quality of service* (*QoS*)*. Given the differences in access mechanisms, frequency resource limitations, and dynamic traffic load, the challenge arises of selecting the optimal configuration for using Ethernet and Wi-Fi interfaces. To address this, the authors propose a simulation modeling method, implemented as a software tool. The developed simulator allows for investigating the impact of key parameters* (*node count, loss probability, and base delays*) *on QoS metrics in a hybrid network.*

The mechanism is implemented using Python, with the random and matplotlib libraries. Configuration parameters are set during initialization, after which the system simulates traffic in Ethernet and Wi-Fi segments separately, considering the stochastic nature of losses and delays as a function of traffic load. Simulation results are aggregated, visualized, and analyzed. Based on this, a score function for performance is formed, and text recommendations for configuration optimization are automatically generated.

Within the experimental study, a series of simulations was conducted with node counts ranging from 10 to 100. The results showed that Wi-Fi exhibited significantly higher levels of delay and loss fluctuations as the network scaled. In contrast, Ethernet demonstrated greater stability, confirming the need for load balancing in favor of the wired segment as network traffic increases.

The proposed method enables the identification of critical configurations, the prediction of QoS degradation, and the making of informed decisions regarding the reconfiguration of hybrid infrastructures. The approach is notable for integrating automated analysis and recommendation generation, greatly enhancing the usability and efficiency of the simulator in practical network design and operation environments. The methodology is promising for further development, particularly for integration with real-time monitoring systems, multi-interface management, and adaptive routing in multi-level networks.

Key words: *heterogeneous network, QoS, traffic simulation, Wi-Fi, Ethernet, configuration optimization, hybrid infrastructure, delay, packet loss, automated modeling.*

УДК 621.391
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10

Компанієць В.О.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Пустовойтов П.Є.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЬ МАСШТАБУВАННЯ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА УМОВ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ

У статті розглядається проблема масштабування мереж в умовах високої варіативності трафіку, зокрема з урахуванням самоподібної природи його розподілу. Актуальність дослідження зумовлена зростанням навантаження на мережеву інфраструктуру через збільшення кількості користувачів та обсягів переданої інформації. Традиційні детерміновані підходи до керування ресурсами втрачають ефективність у ситуаціях, коли трафік демонструє довготривалі залежності та високий ступінь автокореляції. Метою дослідження є розробка стохастичної моделі масштабування мережі, яка дозволяє адаптивно розподіляти ресурси відповідно до поточного навантаження. Запропоновано методологічний підхід, що охоплює аналіз існуючих способів масштабування, математичне моделювання динамічного балансування ресурсів із урахуванням самоподібного трафіку та оцінку ефективності моделі за допомогою імітаційного моделювання. У результаті представлено рівняння динамічного балансування ресурсів, яке має широке практичне застосування в сучасних мережевих технологіях. Зокрема, у програмно-конфігурованих мережах (SDN) запропонована модель дозволяє контролерам у режимі реального часу перерозподіляти ресурси, підвищуючи ефективність інфраструктури та якість обслуговування (QoS). У сфері хмарних обчислень вона використовується для автоматичного масштабування віртуальних машин і контейнерів, що сприяє адаптивному управлінню ресурсами в розподілених системах. У контексті 5G та MEC (Multi-access Edge Computing) модель забезпечує балансування навантаження між базовими станціями й обчислювальними вузлами, підтримуючи сервіси з низькою затримкою. Загалом, представлена модель забезпечує гнучке й адаптивне управління мережею з урахуванням стохастичних характеристик трафіку, сприяючи досягненню оптимального використання інфраструктури в умовах динамічного середовища.

Ключові слова: *самоподібний трафік, стохастичні процеси, модель масштабування мережі, динамічне балансування, SDN, хмарні обчислення, MEC, адаптивне управління ресурсами, підвищення ефективності.*

Постановка проблеми. Масштабування мереж є критичним завданням у сучасних інформаційно-комунікаційних системах, оскільки збільшення кількості користувачів та обсягів трафіку призводить до зростання навантаження на мережеву інфраструктуру. Традиційні підходи до масштабування, засновані на детермінованих методах керування ресурсами, часто не забезпечують необхідної гнучкості та ефективності в умовах високої варіативності мережевого трафіку. Використання стохастичних процесів для адаптивного управління ресурсами може стати ключем до створення ефективних механізмів масштабування, що дозволяють враховувати динамічну природу мережевого середовища.

Однією з головних проблем, що ускладнюють процес масштабування, є самоподібний характер трафіку, який проявляється у високій корельованості та значних коливаннях інтенсивності передачі даних. Самоподібний трафік, на відміну від традиційних моделей Пуассона, характеризується довготривалою залежністю, що ускладнює прогнозування та управління ресурсами. Це може призводити до неефективного розподілу обчислювальних потужностей, перевантаження каналів зв'язку та втрат пакетів, що негативно впливає на якість обслуговування користувачів.

Дослідження спрямоване на розробку моделі масштабування мережі, яка враховує стохастичну природу трафіку та його самоподібні

характеристики. Основною метою є створення адаптивного підходу до розподілу ресурсів, який дозволить оптимізувати продуктивність мережі за умов високої варіативності трафіку. Для цього необхідно розробити математичну модель, що описує процес масштабування з урахуванням стохастичних параметрів трафіку, та розробити метод оцінки ефективності запропонованого підходу.

У межах цього дослідження буде проведено аналіз існуючих методів масштабування мереж і підходів до моделювання самоподібного трафіку. На основі отриманих результатів буде запропоновано стохастичну модель, яка дозволяє адаптивно змінювати параметри мережі відповідно до поточного навантаження. Для оцінки ефективності методу планується використання методів імітаційного моделювання, що дозволить визначити вплив запропонованої моделі на продуктивність мережі.

Методологічний підхід включає кілька основних етапів: аналіз та класифікація існуючих методів масштабування, розробка математичної моделі, її чисельна перевірка та порівняння з традиційними підходами. Також планується розглянути варіанти реалізації запропонованої моделі у сучасних мережевих технологіях, таких як програмно-конфігуровані мережі (SDN) або хмарні обчислення. Це дозволить визначити практичну цінність розробленого підходу та його застосовність у реальних мережевих системах.

Таким чином, дослідження спрямоване на розв'язання актуальної проблеми ефективного масштабування мереж за умов самоподібного трафіку. Результати роботи можуть бути використані для підвищення якості обслуговування в телекомунікаційних системах, оптимізації використання мережевих ресурсів та підвищення стійкості мереж до різких змін трафіку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах інтенсивного розвитку інформаційно-комунікаційних технологій особливої актуальності набуває завдання ефективного масштабування мереж за умов самоподібного трафіку. Проблематика полягає у складності прогнозування та управління ресурсами через довготривалі залежності та високі варіації навантаження, характерні для фрактального трафіку. За останні роки у світовій науковій літературі з'явилась низка досліджень, що пропонують інноваційні підходи до розв'язання цієї задачі на основі стохастичних та гібридних моделей.

Так, у роботі [1] досліджено можливості wavelet-аналізу для точного моделювання фрактальної структури трафіку. Автори продемонстрували високу точність реконструкції самоподібних потоків, проте зазначили, що метод вимагає значних обчислювальних ресурсів та складного налаштування параметрів.

Інший підхід, запропонований у [2], базується на використанні процесів прийняття рішень на основі марковських моделей (Markov Decision Process – MDP) для мереж SDN. Такий підхід забезпечує динамічне управління розподілом ресурсів у режимі реального часу, однак потребує наявності великої кількості достовірних історичних даних для ефективного навчання моделі.

Моделі динамічного масштабування у хмарних середовищах, адаптовані до самоподібного навантаження, були розроблені у [3]. Автори запропонували метод, що забезпечує плавне масштабування обчислювальних ресурсів, хоча його реалізація у великих розподілених системах вимагає додаткової технічної адаптації.

Застосування методів штучного інтелекту, зокрема нейромережевих моделей, для прогнозування навантаження у самоподібному трафіку продемонстровано в [4]. Незважаючи на високу точність прогнозів, моделі є чутливими до якості вхідних навчальних даних.

Цікаву комбінацію марковських ланцюгів і фрактальних функцій як основу для моделювання трафіку подано в [5]. Гібридний підхід добре масштабується та дозволяє точно відображати поведінку мережевого трафіку, проте складність калібрування моделей є суттєвим обмеженням.

У дослідженні [6] стохастичні диференційні рівняння використано для управління ресурсами в мережах типу MEC (Multi-access Edge Computing). Аналітична точність моделі є її перевагою, проте застосування у великих масштабах потребує значних обчислювальних потужностей.

Методи навчання з підкріпленням (reinforcement learning), представлені в [7], дозволяють системам адаптивно реагувати на зміни трафіку з самоподібною структурою. Вони демонструють високий рівень автономності, але потребують серйозної обчислювальної підтримки.

У роботі [8] запропоновано метод маршрутизації, адаптований до фрактального характеру трафіку. Цей підхід дозволяє суттєво знизити втрати пакетів при пікових навантаженнях, хоча його ефективність зменшується при низькому обсязі трафіку.

Ще один перспективний напрям, представлений у [9], ґрунтується на використанні стохастичної апроксимації для масштабування хмарних сервісів. Метод є достатньо універсальним, проте результати мають наближений характер, що може бути критичним у деяких сценаріях.

Нарешті, у дослідженні [10] зроблено спробу інтеграції Hurst-параметра для передбачення навантаження на телекомунікаційну інфраструктуру. Це дозволяє досягти високої точності прогнозування, хоча модель є досить чутливою до помилок при оцінюванні параметра самоподібності.

Таким чином, проаналізовані підходи демонструють багатовекторний розвиток методів масштабування мереж у контексті самоподібного трафіку. Незважаючи на відмінності в математичному апараті та реалізації, більшість досліджень сходяться на необхідності адаптивного управління ресурсами, що базується на стохастичних моделях і фрактальних властивостях трафіку.

Паралельно із зарубіжними дослідженнями, вітчизняні науковці також активно розробляють моделі масштабування телекомунікаційних мереж в умовах самоподібного трафіку. Особливу увагу приділяють застосуванню стохастичних процесів та фрактального аналізу для побудови адаптивних підходів до управління ресурсами.

У роботі [11] запропоновано математичну модель генерації самоподібного трафіку з використанням розподілу Парето та методу максимальної правдоподібності для оцінки параметрів. Перевагою підходу є можливість гнучкої генерації пакетних потоків із заданим ступенем самоподібності, проте метод обмежений у застосуванні до реальних багатокомпонентних мереж.

Дослідження [12] присвячене структурно-параметричній ідентифікації самоподібного трафіку із застосуванням глобальної та локальної оптимізації. Така композиція дозволяє досягти високої точності при прогнозуванні трафіку та виявленні аномалій. Основним недоліком є підвищена чутливість до вибору початкових параметрів моделі.

У роботі [13] розглянуто сучасні підходи до застосування технологій штучного інтелекту в управлінні телекомунікаційними мережами. Акцент зроблено на автоматизацію обробки ресурсів у 5G-мережах, що забезпечує гнучкість та ізоляцію між логічними і фізичними ресурсами. Недоліком є складність інтеграції таких систем у вже існуючу інфраструктуру.

Запропонований у [14] підхід до оптимізації роботи когнітивних радіомереж базується на використанні нейронних мереж для прийняття рішень. Такий інтелектуальний механізм підвищує ефективність функціонування мереж, однак потребує великого обсягу навчальних даних та ускладнює аналіз поведінки моделі.

У дослідженні [15] автори пропонують застосування стохастичних алгоритмів оптимізації (градієнтного спуску та стохастичного пошуку) для адаптивного управління ресурсами. Модель показала добрі результати в мінімізації затримок, але обчислювальна складність алгоритмів обмежує їх застосування у масштабних системах.

Інноваційний підхід до ідентифікації мережевого трафіку представлено в [16], де використано глобальні методи оптимізації та інтелектуальні базисні функції. Метод дає змогу підвищити точність передбачення трафіку, але його ефективність значною мірою залежить від обсягу вхідних даних.

У роботі [17] розроблено методику моделювання змінного трафіку, яка враховує динаміку навантаження та дозволяє адаптивно налаштовувати параметри мережі. Високий рівень відповідності моделі до реальних умов є суттєвою перевагою, хоча її реалізація потребує точного калібрування параметрів.

Нарешті, у [18] розглянуто задачі маршрутизації фракталоподібного трафіку в комп'ютерних мережах. Запропоновані алгоритми дозволяють зменшити втрати пакетів та покращити якість обслуговування, проте при значних об'ємах трафіку вони потребують попередньої агрегації даних, що знижує швидкість реагування.

Таким чином, українські науковці пропонують широкий спектр підходів до розв'язання задачі масштабування мереж з урахуванням самоподібності трафіку – від статистичного моделювання до застосування методів штучного інтелекту. Хоча більшість з них стикається з труднощами реалізації у великих системах, вони створюють теоретичну основу для подальшого вдосконалення адаптивних механізмів управління ресурсами у динамічних телекомунікаційних середовищах.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка стохастичної моделі масштабування мережі, яка дозволяє адаптивно розподіляти ресурси відповідно до поточного навантаження.

Виклад основного матеріалу. Масштабування мережі в умовах самоподібного трафіку є складним завданням, оскільки традиційні

моделі керування ресурсами не враховують довготривалу залежність і високу варіативність мережевого навантаження. Самоподібний трафік проявляє властивості фрактальності та важко прогнозованих сплесків навантаження, що ускладнює розподіл ресурсів у мережах. Для ефективного масштабування необхідно використовувати математичні методи, здатні апроксимувати складні процеси та передбачати їх динаміку. У цьому контексті марківська апроксимація є перспективним підходом, що дозволяє спростити модель самоподібного трафіку, наближаючи її до керованих стохастичних систем.

Марківські випадкові процеси можуть бути використані для моделювання навантаження в мережі, оскільки вони добре підходять для опису систем із залежностями короткої пам'яті. Хоча самоподібний трафік має довготривалі кореляції, його можна апроксимувати через багаторівневі марківські моделі, що дозволяє описати зміну станів навантаження у спрощеній формі. Наприклад, можна застосувати Марківський процес із прихованими станами $\begin{pmatrix} \underline{H} \\ \underline{M} \\ M \end{pmatrix}$ або Марківські моделі черг $\begin{pmatrix} \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{G} & ,\underline{M} \\ 1 & \infty \end{pmatrix}$ для оцінки поведінки трафіку та адаптивного перерозподілу мережевих ресурсів.

Математична модель масштабування на основі марківських випадкових процесів включає подання трафіку у вигляді процесу з фіксованими станами та перехідними ймовірностями між ними. Для цього можна використовувати ланцюги Маркова із дискретними станами, де кожен стан відповідає певному рівню навантаження, а ймовірність переходу між станами залежить від емпіричних даних або аналітичних розрахунків. Враховуючи самоподібність трафіку, марківська апроксимація (рис. 1) може бути реалізована через багатоступеневі ланцюги, що дозволяє відобразити зміну трафіку на різних часових масштабах.

Оцінка основних параметрів моделі включає визначення інтенсивності трафіку , що відображає частоту надходження запитів, коефіцієнта самоподоби для оцінки залежностей між потоками, а також латентності , що характеризує середній час очікування запитів у мережі. Використовуючи стохастичну апроксимацію, можна отримати рівняння динамічного балансування ресурсів, що враховує стохастичні характеристики мережі та дозволяє адаптивно масштабувати інфраструктуру відповідно до реального навантаження.

Для адаптивного масштабування мережевих ресурсів за умов стохастичного навантаження можна використати рівняння динамічного балансування ресурсів, що базується на марківських випадкових процесах та стохастичних диференційних рівняннях.

Ось узагальнене рівняння, яке враховує зміну ресурсів у мережі залежно від поточного навантаження та його коливань:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \alpha\lambda(t) - \beta\mu(t)R(t) + \sigma W(t), \qquad (1)$$

де $R(t)$ – кількість виділених ресурсів у момент часу t; $\lambda(t)$ – інтенсивність вхідного трафіку в момент часу t; $\mu(t)$ – середня швидкість обслуговування запитів (залежить від продуктивності мережі); α – коефіцієнт масштабування ресурсів у відповідь на зміну навантаження; β – коефіцієнт звільнення ресурсів у процесі їх оптимізації; $\sigma W(t)$ – стохастичний шум, що моделює випадкові флуктуації навантаження (білий шум Вінера).

Для опису самоподібного трафіку потрібно перейти до фрактальних та довгопам'ятних процесів, Замість рівномірного шуму $W(t)$ у рівнянні динамічного балансування можна використати фрактальний процес:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \alpha\lambda(t) - \beta\mu(t)R(t) + \sigma B_H(t), \qquad (2)$$

де $B_H(t)$ – фрактальний броунівський рух із параметром Херста H, який моделює самоподібність.

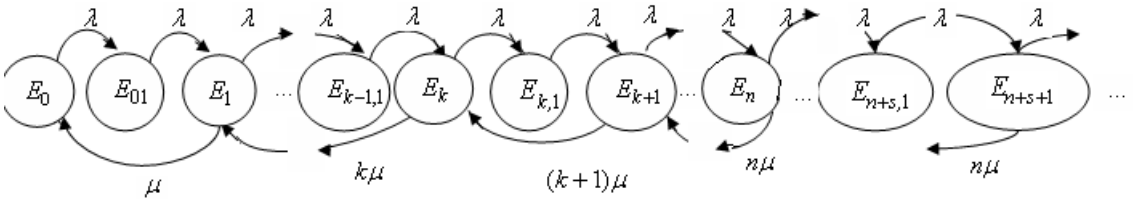


Рис. 1. Граф станів та переходів системи без втрат з потоком ерланга, що надходить

Самоподібність означає, що мережевий трафік не є рівномірним, а має характерні сплески, які можуть повторюватися на різних часових масштабах. Це ускладнює використання традиційних методів масштабування, які базуються на середньому навантаженні або короткострокових прогнозах. Для точного моделювання варто враховувати довготривалу кореляцію (Hurst-параметр, H), що визначає рівень самоподібності трафіку:

$$0.5 < H < 1. \quad (3)$$

Якщо H наближається до 1, це означає, що сплески навантаження можуть бути дуже затяжними, і для їх компенсації потрібно підтримувати більший запас ресурсів.

Адаптивне масштабування мережі виконується таким чином, що при зростанні інтенсивності трафіку $\lambda(t)$ система динамічно збільшує виділені ресурси $R(t)$. Це дозволяє оперативно реагувати на зміну навантаження і підтримувати належну якість обслуговування. У випадку зменшення навантаження ресурси поступово звільняються зі швидкістю, пропорційною середній швидкості обслуговування запитів $\mu(t)$, що дозволяє уникнути зайвого перевитрачання обчислювальних потужностей.

Стохастична варіативність трафіку додає додаткову складність у процес масштабування. Член $\sigma W(t)$ чи $\sigma B_H(t)$ у рівнянні моделює випадкові флуктуації трафіку, які можуть виникати через непередбачувані зміни в поведінці користувачів або раптові сплески навантаження. Це особливо важливо для мереж з високими динамічними змінами, таких як мобільні або хмарні платформи, де попит може коливатися протягом коротких проміжків часу.

Балансування між продуктивністю та ефективністю досягається за допомогою параметрів α і β, які визначають реакцію системи на зміну навантаження. Коефіцієнт α відповідає за швидкість збільшення ресурсів у відповідь на зростання інтенсивності трафіку, тоді як коефіцієнт β контролює ефективність звільнення ресурсів після зниження навантаження. Оптимальний вибір цих параметрів дозволяє уникнути перевитрачання обчислювальних потужностей та забезпечує стабільність роботи мережі.

Модель можна розширити для розподілених систем, враховуючи особливості багатовузлової інфраструктури. У такому випадку рівняння набуває узагальненого вигляду для кожного вузла мережі:

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = \alpha_i \lambda_i(t) - \beta_i \mu_i(t) R_i(t) + \\ + \sigma_i W_i(t), \quad i = 1,2,\ldots,N, \quad (4)$$

де i – індекс вузла в мережі, H – загальна кількість вузлів. Таке рівняння дозволяє враховувати неоднорідність навантаження та різну продуктивність окремих сегментів мережі.

Моделювання та практичні результати.

Уявімо, що в дата-центрі працює хмарна платформа для потокового відео, яка динамічно виділяє ресурси залежно від кількості користувачів. Протягом дня трафік сильно змінюється: вранці навантаження низьке, у вечірні години – максимальне, а протягом дня можливі різкі сплески активності. Система повинна автоматично збільшувати або зменшувати обчислювальні ресурси так, щоб уникнути перевантаження та мінімізувати витрати.

Щоб змоделювати цей процес, використовуємо рівняння динамічного балансування ресурсів (1). У свою чергу середня інтенсивність запитів моделюється функцією:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + A\sin(\omega t) + \eta(t), \quad (5)$$

де λ_0 – базова кількість запитів, A – амплітуда добових коливань, ω – частота змін, а $\eta(t)$ – стохастичний процес, що імітує випадкові стрибки трафіку.

Для знаходження оптимальної кількості серверів обчислюємо стаціонарний стан рівняння. Визначимо середній рівень ресурсів, коли система стабільна:

$$\mathbb{E}\left[R^*\right] = \frac{\alpha\lambda_0}{\beta\mu}. \quad (6)$$

Підставимо конкретні значення: $\alpha = 0.8$, $\beta = 0.5$, $\mu = 100$ запитів/сек, а середня кількість вхідних запитів $\lambda_0 = 5000$ на секунду.

$$R^* = \frac{0.8 \times 5000}{0.5 \times 100} = 80. \quad (7)$$

Тобто в середньому потрібно підтримувати 80 активних серверів. Але через стохастичні зміни трафіку це значення буде коливатися. Для визначення допустимих меж обчислюємо дисперсію ресурсу:

$$Var(R) = \frac{\sigma^2}{2\beta\mu}. \quad (8)$$

При значенні $\sigma = 300$, отримаємо:

$$Var(R) = \frac{300^2}{2 \times 0.5 \times 100} = 900. \quad (9)$$

Тоді стандартне відхилення σ_R = 30, а отже, ресурс буде коливатися в межах 80 ± 30. Це означає, що у періоди високого навантаження потрібно автоматично збільшувати кількість серверів до 110, а у періоди низького – зменшувати до 50.

Таким чином, застосування рівняння динамічного балансування дозволяє хмарній платформі в реальному часі адаптуватися до змінного навантаження, уникаючи простоїв та перевитрат ресурсів.

Наведемо таблицю, яка представляє порівняння двох підходів до моделювання мережевого трафіку: пуассонівського та фрактального. У стовпцях наведено значення кількості запитів для кожного підходу та відповідна кількість необхідних серверів для балансування ресурсів протягом доби. Пуассонівський процес характеризується випадковими різкими сплесками навантаження, що призводить до частих і раптових змін у необхідності масштабування серверів. Натомість фрактальний процес демонструє довготривалу кореляцію, що забезпечує більш плавні зміни трафіку та стабільніше використання ресурсів.

Дані підтверджують, що традиційний підхід масштабування на основі пуассонівського процесу може спричиняти надмірні витрати через необхідність частого масштабування ресурсів. У випадку фрактального трафіку, зміни навантаження більш прогнозовані, що дозволяє адаптивно налаштовувати інфраструктуру без зайвого перевитрачання потужностей. Використання моделі, яка враховує самоподібність трафіку, сприяє ефективнішому балансуванню ресурсів, оскільки забезпечує стабільніше управління потужностями серверів навіть у пікові години.

Ці результати вказують на важливість урахування самоподібності трафіку при проєктуванні масштабованих мережевих систем. Впровадження адаптивних алгоритмів, що базуються на аналізі фрактальних процесів, дозволяє знизити витрати на інфраструктуру та підвищити ефективність розподілу ресурсів у динамічних середовищах.

Таблиця 1

Порівняння масштабування ресурсів при пуассонівському та фрактальному трафіку протягом доби

Година	Кількість запитів (Пуассонівський)	Кількість запитів (Фрактальний)	Сервери (Пуассонівський)	Сервери (Фрактальний)
0	5469	5024	87,5	80,4
1	6035	6527	96,6	104,4
2	6519	6932	104,3	110,9
3	6915	7467	110,6	119,5
4	7220	7771	115,5	124,3
5	7466	7503	119,5	120,1
6	7494	8028	119,9	128,5
7	7412	8261	118,6	132,2
8	7218	8378	115,5	134
9	6955	7696	111,3	123,1
10	6509	7843	104,1	125,5
11	6039	6800	96,6	108,8
12	5533	6517	88,5	104,3
13	4970	6875	79,5	110
14	4481	5997	71,7	96
15	4108	5356	65,7	85,7
16	3762	5078	60,2	81,3
17	3537	4677	56,6	74,8
18	3547	3989	56,8	63,8
19	3569	4084	57,1	65,4
20	3758	3859	60,1	61,8
21	4145	4366	66,3	69,9
22	4499	4413	72	70,6
23	4967	5515	79,5	88,2

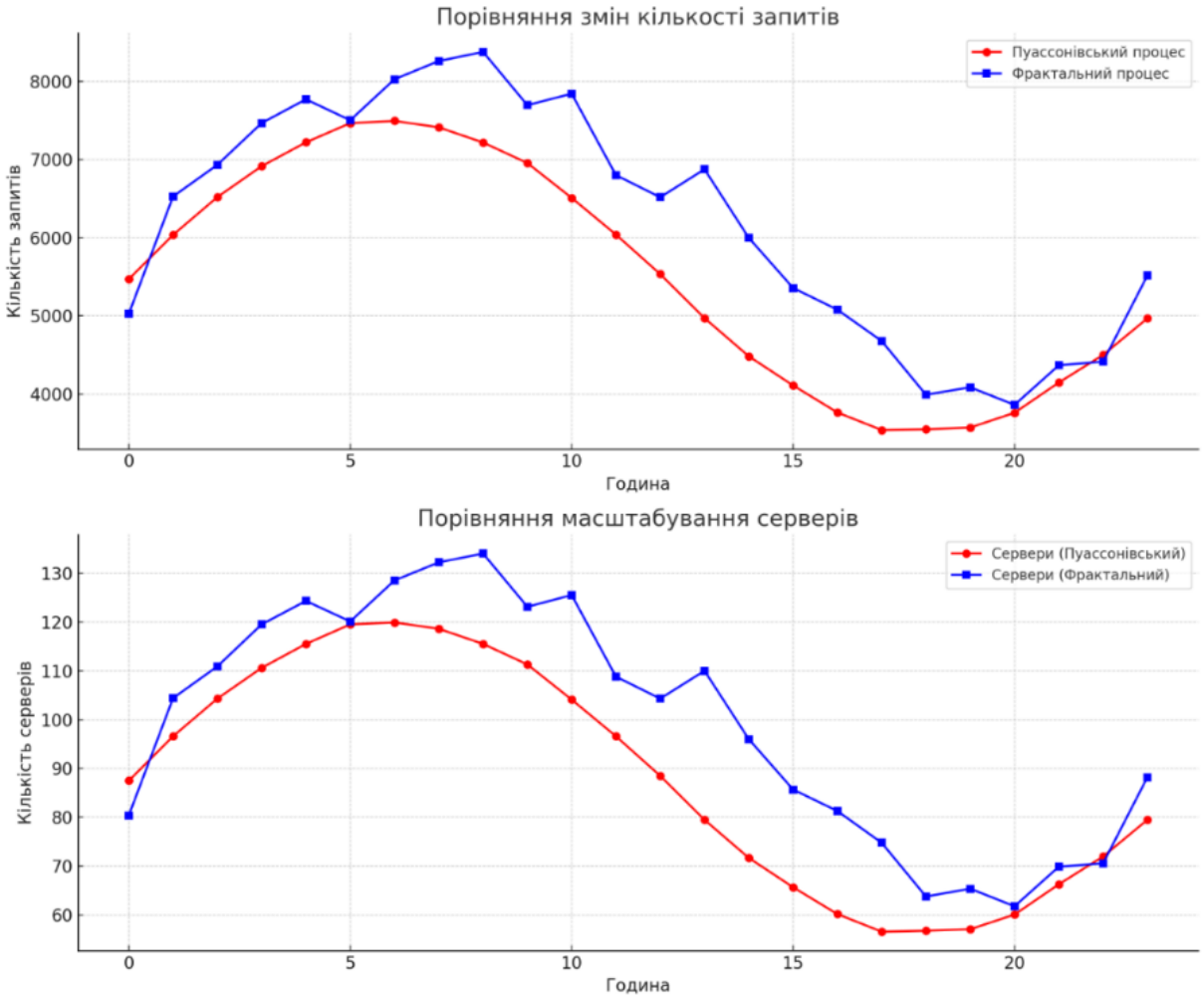


Рис. 1. Масштабування ресурсів мережі при динамічній зміні навантаження

Останній графік ілюструє динаміку зміни кількості запитів та необхідної кількості серверів у двох підходах до моделювання трафіку: пуассонівському та фрактальному. Графік кількості запитів показує, що пуассонівський процес має різкіші коливання, що обумовлено випадковою природою прибуття трафіку. Фрактальний трафік, навпаки, демонструє плавніші зміни з періодичними довготривалими сплесками, що відповідає реальним спостереженням у мережевих системах.

На другому графіку, який відображає необхідну кількість серверів, помітна значна відмінність між підходами. У традиційному масштабуванні, заснованому на пуассонівському процесі, часті та раптові зміни навантаження призводять до різких стрибків у кількості необхідних серверів. Це може створювати проблеми в управлінні ресурсами, оскільки система змушена постійно додавати або зменшувати потужності, що може бути неекономічним. У випадку самоподібного трафіку процес масштабування більш стабільний: кількість серверів змінюється плавно, що дозволяє уникнути зайвих витрат та забезпечити ефективніше використання ресурсів.

Ці результати свідчать про те, що використання моделей, які враховують самоподібність трафіку, дозволяє створювати більш ефективні системи управління мережевими ресурсами. Вони дають змогу не тільки передбачати зміну навантаження, а й адаптувати інфраструктуру до довготривалих трендів у трафіку, що покращує якість обслуговування та зменшує перевитрати.

Висновки. Рівняння динамічного балансування ресурсів має широке практичне застосування в сучасних мережевих технологіях. Однією з ключових сфер його використання є програмно-конфігуровані мережі (SDN). У таких мережах контролери SDN можуть застосовувати це рівняння для динамічного перерозподілу ресурсів, реагуючи на зміни навантаження в режимі реального часу. Це дозволяє покращити ефективність використання мережевої інфраструктури та підвищити рівень якості обслуговування (QoS).

У сфері хмарних обчислень модель використовується для автоматичного масштабування віртуальних машин та контейнерів відповідно до поточного трафіку. Це дає можливість гнучко керувати ресурсами у великих розподілених системах, забезпечуючи їхню адаптацію до змінних умов роботи. Використання стохастичних процесів у прогнозуванні навантаження дозволяє мінімізувати затримки та уникнути надмірного споживання ресурсів.

Ще однією важливою областю застосування є 5G та MEC (Multi-access Edge Computing). У цих мережах рівняння допомагає балансувати навантаження між базовими станціями та обчислювальними вузлами, що особливо актуально для підтримки сервісів з низькою затримкою, таких як автономний транспорт, розширена реальність та критично важливі IoT-додатки.

Загалом, ця модель забезпечує адаптивне керування мережевими ресурсами, створюючи баланс між продуктивністю та ефективністю, а також враховуючи стохастичні характеристики трафіку. Це дозволяє досягти оптимального використання інфраструктури в умовах динамічних змін навантаження.

Список літератури:

1. Zhang Y., Li H., Xu M. Fractal Traffic Modeling in Broadband Networks Using Wavelet Techniques. IEEE Access, 2021. Vol. 9. P. 33512–33524.
2. Chen W., Li J. Dynamic Resource Allocation in SDN via Markov Decision Processes. Computer Networks, 2022. Vol. 204. 108720.
3. Wang K., Zhou X., Liu S. Adaptive Scaling in Cloud Systems with Self-Similar Traffic. Future Generation Computer Systems, 2020. Vol. 108. P. 317–328.
4. Singh R., Kumar D. Neural Prediction of Self-Similar Network Loads for Edge Scalability. Journal of Network and Computer Applications, 2023. Vol. 214. 103497.
5. Almeida J., Costa B., Silva L. Hybrid Stochastic-Fractal Models for Network Traffic Simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022. Vol. 117. 102503.
6. Ito K., Yamamoto T. Stochastic Differential Models for Resource Scaling in Edge Computing. ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems, 2021. Vol. 6 (2). Article 11.
7. Johnson M., Lopez C., Patel A. Reinforcement Learning for Self-Similar Traffic Scaling in Data Centers. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023. Vol. 20 (1). P. 515–528.
8. Lin D., Kuo Y. Routing Optimization under Fractal Traffic Conditions. Computer Communications, 2021. Vol. 169. P. 25–34.
9. Farooq A., Nawaz R., Zahid M. Stochastic Approximation-Based Scaling Algorithms for Cloud Resource Management. Journal of Cloud Computing, 2022. Vol. 11 (1). Article 32.
10. Tan C., Zhou J. Hurst Parameter Estimation for Predictive Load Management in Telecom Systems. Telecommunication Systems, 2020. Vol. 74. P. 43–57.
11. Пустовойтов П.Є., Компанієць В.О. Метод математичного моделювання самоподібного трафіку у інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава: ПНТУ, 2024. Т. 4 (78). С. 187–189. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.187.
12. Корнієнко В., Герасіна О. Прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж для виявлення аномалій. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2022. 15 с.
13. Васильківський М., Болдирєва О., Варгатюк Г., Будаш М. Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML. *Телекомунікації та Інтернет-технології*, 2021. 18 с.
14. Севрюков О. Методи керування інтелектуальними телекомунікаційними мережами для підвищення ефективності їх функціонування. *Інформаційні системи та технології*, 2023. 20 с.
15. Волк М.О., Поповкін М.М. Стохастичні методи оптимізації розподілу обчислювальних та мережевих ресурсів. *Обчислювальні методи та системи*, 2024. 16 с.
16. Якимчук Н. Глобальні методи оптимізації для структурно-параметричної ідентифікації трафіку. *Комп'ютерні науки та кібербезпека*, 2023. 14 с.
17. Решетнікова П. Методика моделювання трафіку в комп'ютерних мережах для адаптивного налаштування параметрів. *Системний аналіз та моделювання*, 2023. 12 с.
18. Севрюков О.В. Моделі аналізу та маршрутизації фракталоподібного трафіку у комп'ютерних мережах. *Телекомунікаційні системи та мережі*, 2024. 17 с.

Kompaniiets V.O., Pustovoitov P.E. NETWORK SCALPING MODEL BASED ON STOCHASTIC PROCESSES UNDER SELF-SIMPLE TRAFFIC CONDITIONS

The article considers the problem of scaling networks in conditions of high variability of traffic, in particular, taking into account the self-similar nature of its distribution. The relevance of the study is due to the increase in the load on the network infrastructure due to the increase in the number of users and the volume of transmitted information. Traditional deterministic approaches to resource management lose their effectiveness in situations where traffic demonstrates long-term dependencies and a high degree of autocorrelation – characteristic features of self-similar traffic. The purpose of the study is to develop a stochastic model of network scaling that allows for adaptive allocation of resources in accordance with the current load. A methodological approach is proposed that includes the analysis of existing scaling methods, mathematical modeling of dynamic resource balancing taking into account self-similar traffic, and assessment of the effectiveness of the model using simulation modeling. As a result, a dynamic resource balancing equation is presented, which has wide practical application in modern network technologies. In particular, in software-defined networks (*SDN*)*, the proposed model allows controllers to real-timely reallocate resources, improving infrastructure efficiency and quality of service* (*QoS*)*. In the field of cloud computing, it is used for automatic scaling of virtual machines and containers, which contributes to adaptive resource management in distributed systems. In the context of 5G and MEC* (*Multi-access Edge Computing*)*, the model provides load balancing between base stations and computing nodes, supporting low-latency services. Overall, the presented model provides flexible and adaptive network management taking into account stochastic traffic characteristics, contributing to achieving optimal infrastructure utilization in a dynamic environment.*

Key words: *self-similar traffic, stochastic processes, network scaling model, dynamic balancing, SDN, cloud computing, MEC, adaptive resource management, efficiency improvement.*

УДК 616.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/11

Овдієнко П.К.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев Д.Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ СКРИНІНГУ СЛУХУ В ПОВСЯКДЕННОМУ ЖИТТІ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ ЗАСОБАМИ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У даній роботі досліджується проблема здійснення скринінгу слуху в умовах повсякденного життя, зокрема акцентується увага на складнощах, що виникають при ранньому виявленні порушень слуху серед осіб, які не мають постійного доступу до професійного, відкаліброваного медичного обладнання. З цією метою проведено огляд сучасних патентних рішень, що стосуються методів і технічних засобів аудіометричного тестування та слухового скринінгу. Проведений аналіз наявних технологічних рішень дав змогу визначити їхні ключові переваги, а також виявити основні недоліки, зокрема при використанні поза межами професійного медичного середовища.

Метою дослідження є розроблення концептуально нового підходу до організації процесу скринінгу слуху шляхом інтеграції мобільних технологій, що активно застосовуються в повсякденному житті. Сучасні мобільні пристрої, зокрема смартфони, мають високоякісні динаміки, мікрофони та значні обчислювальні ресурси, що дозволяють реалізовувати програмне забезпечення з елементами штучного інтелекту. У межах цього дослідження запропоновано новаторську систему у вигляді мобільного додатка, призначену для попереднього тестування слуху в домашніх умовах без необхідності звернення до медичних установ. Застосування методів штучного інтелекту забезпечує персоналізацію процесу тестування, підвищуючи його точність, ефективність і зручність для кінцевого користувача.

Запропоноване рішення демонструє високий потенціал щодо формування нового стандарту в сфері первинного скринінгу слуху. Подальше технічне вдосконалення системи сприятиме підвищенню точності та надійності діагностичних результатів. У перспективі це відкриває можливості для широкого впровадження подібних технологій у глобальному масштабі, забезпечуючи доступність слухового скринінгу для мешканців віддалених, економічно нерозвинених або соціально вразливих регіонів. Таким чином, представлена система може стати основою нової парадигми превентивної отологічної діагностики на міжнародному рівні.

Ключові слова: *смартфон, скринінг слуху, повсякденне життя, аудіометрія, мобільний додаток, штучний інтелект.*

Постановка проблеми. На сьогоднішній день процес скринінгу слуху залишається складним і малодоступним для широких верств населення. Незважаючи на наявність професійного обладнання та технологій для діагностики слухових порушень, такі послуги часто є недоступними для населення країн з низьким рівнем технічного розвитку, а також для соціально вразливих груп. Однією з основних проблем є недооцінка важливості ранньої діагностики: багато людей не підозрюють про наявність відхилень на початкових стадіях, вважаючи, що втрата слуху є виключно проблемою людей похилого віку.

Серед додаткових бар'єрів можна відзначити нестачу кваліфікованих спеціалістів, використання застарілого обладнання та високу вартість аудіометричного тестування. Усе це значною мірою обмежує можливості своєчасного виявлення слухових порушень.

У даній роботі розглядається підхід до вирішення зазначених проблем шляхом розробки мобільного програмного забезпечення для попереднього скринінгу слуху. Основною метою є створення інструменту, який дозволить користувачеві самостійно пройти базове тестування та отримати відповідь на запитання: чи є необхідність звернення до профільного спеціаліста, або ж проведення точнішої діагностики із застосуванням професійного обладнання. Розробка таких систем сприятиме підвищенню

доступності, своєчасності та ефективності скринінгу слуху шляхом залучення мобільних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У цьому розділі проаналізовано патентні рішення, що стосуються систем скринінгу слуху, з метою визначення ключових технічних підходів, методів, інновацій та можливостей для вдосконалення існуючих технологій.

Патент міжнародний WO2015044926A1 «AUDIOMETRY SYSTEM AND METHOD» [1] описує технічне рішення у сфері мобільної аудіометрії [3], яке полягає в розробці системи та методу скринінгу слуху з використанням мобільного пристрою, спеціалізованого програмного забезпечення та навушників із визначеними характеристиками (рис. 1). Згідно з описом, система включає мобільний пристрій, який виконує функцію платформи для аудіометричного інтерфейсу, здатного генерувати та передавати попередньо визначені тестові сигнали до навушників. Навушники відтворюють звукові сигнали певної частоти та інтенсивності, що сприймаються користувачем (об'єктом скринінгу). Керування тестовим процесом може здійснювати як оператор (наприклад, медичний працівник), так і сам користувач, який взаємодіє з інтерфейсом через простий механізм зворотного зв'язку – підтвердження сприйняття звуку за допомогою відповіді типу «так» або «ні».

Серед ключових технічних особливостей винаходу слід відзначити автоматизоване калібрування системи на основі внутрішнього мікрофона мобільного пристрою, що дозволяє коригувати інтенсивність тестових сигналів у разі виявлення відхилень від заданих параметрів. Крім того, система забезпечує безперервний моніторинг рівня навколишнього шуму з метою підвищення точності вимірювання та запобігання впливу сторонніх звуків на результати тестування. Результати скринінгу можуть зберігатися локально або передаватися на віддалений сервер для подальшого аналізу та зберігання. Завдяки своїй мобільності, простоті використання та можливості проведення тестування в польових умовах, запропонована система має значний потенціал для широкого застосування, зокрема у первинній медичній допомозі, віддалених регіонах та навчальних закладах.

Незважаючи на значні переваги, патент має кілька обмежень. По-перше, ефективність системи залежить від якості навушників і точності калібрування, що може бути важливим у складних умовах тестування. По-друге, постійний моніторинг навколишнього шуму може не завжди забезпечити достатню точність, якщо в середовищі присутні неочікувані звукові перешкоди.

Патент США US20130060159A1 «Hearing screening application for mobile devices» [2] описує комп'ютеризований метод і систему для скринінгової оцінки слуху за допомогою мобільних пристроїв (рис. 2). Розробка спрямована на забезпечення можливості самостійної перевірки слуху користувачем без необхідності звернення до лікаря або спеціалізованого медичного закладу.

Основною технологією є мобільний додаток, який відтворює звукові сигнали різної частоти й інтенсивності та аналізує відповіді

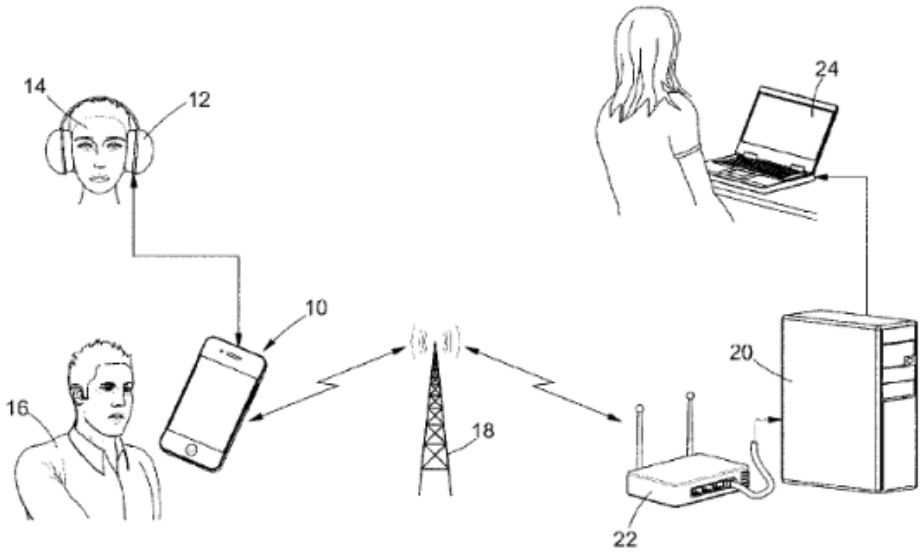


Рис. 1. Складові аудіометричної системи відповідно патенту WO2015044926A1

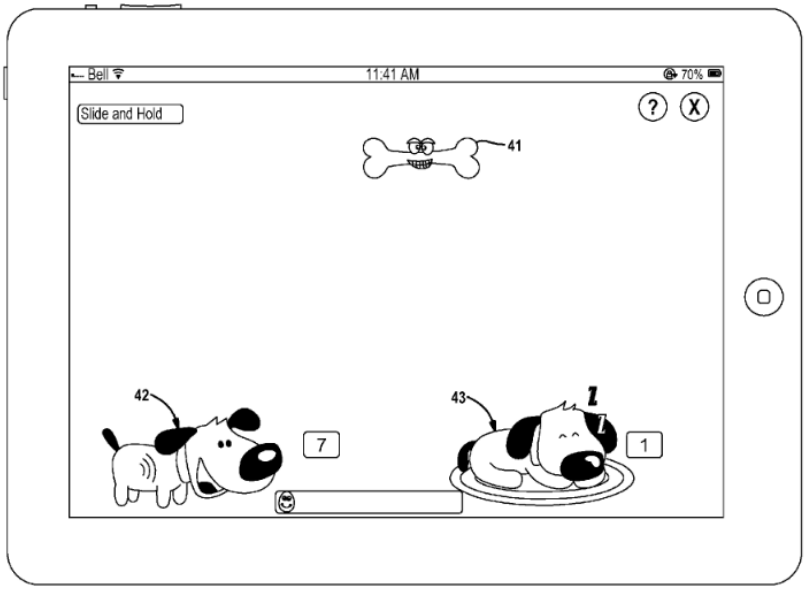


Рис. 2. Зовнішній вигляд застосунку згідно технічного рішення за патентом US20130060159A1

користувача. В основі методу лежить створення аудіограми, яка відображає індивідуальні пороги слуху на різних частотах. Тестування здійснюється за допомогою динаміків пристрою, а для реєстрації реакцій може використовуватись сенсорний екран або кнопки. Для підвищення точності система передбачає попереднє калібрування звукового виходу пристрою із використанням вбудованого мікрофона. Це дозволяє врахувати особливості апаратного забезпечення та умови зовнішнього шуму під час тестування. Додаток надає візуалізацію результатів тесту (рис. 3) та рекомендації щодо подальших дій користувача.

Однак, застосунок, описаний у патенті, має кілька суттєвих обмежень. По-перше, точність проведеного тесту значною мірою залежить від якості апаратних компонентів мобільного пристрою, зокрема мікрофона та динаміків, що може впливати на точність результатів. По-друге, на результати вимірювань може впливати зовнішній шум, і для досягнення більшої точності можуть знадобитися додаткові пристрої, зокрема, навушники або потенційно і кістковий вібратор.

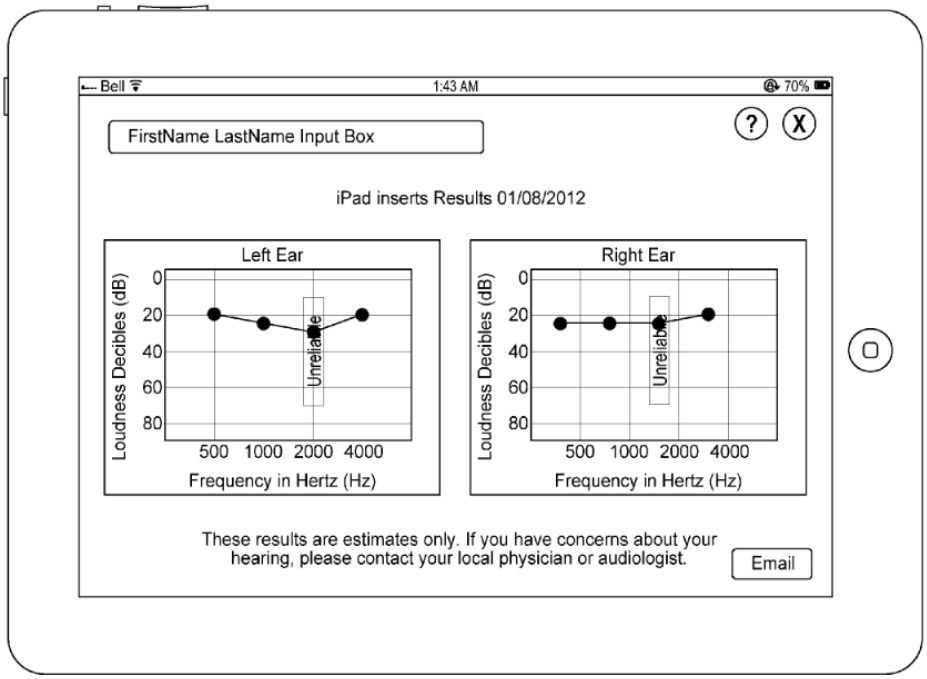


Рис. 3. Візуалізація результатів тесту згідно патенту US20130060159A117171

Крім того, запропонований метод має обмежену діагностичну точність і не може повністю замінити консультацію лікаря. Окремою проблемою є необхідність врахування індивідуальних особливостей користувача, а також ризик отримання неправильних результатів через технічні обмеження пристрою, що вимагає подальшого вдосконалення технології для підвищення її ефективності та точності.

Постановка завдання. Незважаючи на інноваційність та потенційні переваги обох рішень, представлені у патентах технології мають низку важливих недоліків, що обмежують їхню ефективність на практиці. Основними проблемами є висока залежність достовірності вимірювань від якості апаратного забезпечення – навушників, мікрофонів, динаміків, а також від правильності калібрування системи. Умови зовнішнього середовища, зокрема наявність шумових перешкод, можуть суттєво впливати на результати тестування, що потребує постійного моніторингу й додаткових технічних рішень для компенсації впливу шуму. Окрім того, методи, описані у патентах, демонструють обмежену діагностичну достовірність результатів і не здатні повноцінно замінити професійну медичну діагностику. Важливим аспектом також є необхідність врахування індивідуальних особливостей користувача, оскільки ігнорування цих чинників може призвести до хибних результатів.

З урахуванням виявлених недоліків, з метою створення більш удосконаленої системи, доцільно запропонувати наступні підходи:

– інтеграція всього процесу в межах одного пристрою – смартфона [4], що забезпечить компактність, точність та зручність використання;

– зменшення ймовірності похибок та підвищення достовірності результатів тестування шляхом упровадження елементів штучного інтелекту.

Метою цієї наукової статті є дослідження та розробка концептуального підходу до скринінгу слуху, адаптованого для використання в умовах повсякденного життя. Запропонована концепція спрямована на подолання обмежень, характерних для наявних методів, зокрема пов'язаних із недостатньою достовірністю результатів, впливом факторів навколишнього середовища (наприклад, фоновий шум, акустика приміщення) та залежністю від спеціалізованого апаратного забезпечення. Розробка ефективного, доступного та надійного засобу скринінгу слуху має на меті сприяти ранньому виявленню слухових порушень і підвищити загальний рівень обізнаності про стан слуху в широких верствах населення.

Виклад основного матеріалу. Запропонована концепція представлена на рис. 4. Основна ідея полягає у створенні доступного інструменту для попередньої оцінки слухових здібностей за допомогою стандартного смартфона, що не потребує додаткового обладнання. Такий підхід є особливо актуальним для осіб, які сумніваються у доцільності глибокого медичного обстеження, не мають фінансової або фізичної можливості його пройти, або ж не підозрюють про потенційні порушення слуху.

Новаторським елементом даної концепції є інтеграція модулів штучного інтелекту, які дозволяють значно підвищити достовірність тестування. Зокрема, ШІ здійснює корекцію впливу навколишнього середовища, адаптує тест до умов конкретного користувача, а також аналізує отриманий фідбек для вдосконалення майбутніх тестів. Таким чином, зменшується вплив шумів, варіацій у якості навушників та інших факторів, які можуть спотворити результат.

Додаток буде орієнтований на повну автономність, спираючись виключно на апаратні ресурси смартфона (вбудовані мікрофони, динаміки, сенсори), що забезпечує широке охоплення аудиторії без потреби у спеціалізованому медичному обладнанні. Такий підхід відкриває можливість масштабного застосування в домашніх умовах, навчальних закладах, сільських місцевостях тощо.

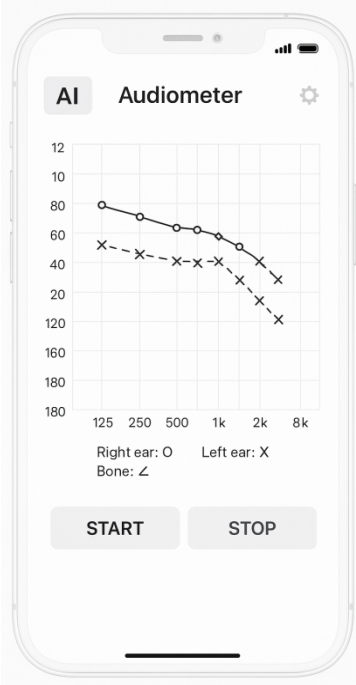


Рис. 4. Запропонована концепція

Користувачі матимуть змогу експортувати результати тестування у форматі окремого звіту, що може бути переданий медичному фахівцю як попередній діагностичний матеріал. Це сприятиме інтеграції додатку у медичну сферу та потенційній сертифікації.

Як напрям майбутніх досліджень і удосконалень, розглядається створення відкритої онлайн-платформи, що слугуватиме середовищем для обміну досвідом між користувачами, розробниками та ентузіастами щодо налаштувань штучного інтелекту і параметрів тестування для широкого спектра аудіопристроїв. За аналогією з такими успішними прикладами взаємодії спільноти, як Steam Workshop [5] у сфері відеоігор, запропонована платформа сприятиме формуванню активного співтовариства навколо адаптації та вдосконалення алгоритмів тестування слуху.

Висновки. Дослідження, проведене в межах цієї роботи, є вагомим внеском у вдосконалення мобільних засобів для скринінгу слуху. Запропоновані новаторські рішення спрямовані на підвищення достовірності результатів тестування та покращення зручності користування. Ключовими перевагами розробки є її доступність, інтуїтивність інтерфейсу, а також можливість швидкого отримання результатів.

Подальше вдосконалення розробки доцільно спрямувати на мінімізацію похибок у результатах тестування, зокрема шляхом адаптації алгоритмів під різні акустичні умови, типи навушників та індивідуальні особливості користувачів. Такі удосконалення можуть наблизити ефективність додатку до професійних аудіометричних систем, які використовуються у медичних закладах.

Розроблений мобільний додаток вирішує одну з ключових проблем, визначених у дослідженні, а саме – обмежений доступ до регулярного тестування слуху для широких верств населення. Завдяки широкій розповсюдженості смартфонів та використанню інструментів штучного інтелекту, програма надає можливість проведення попереднього аналізу слуху у домашніх умовах. Такий підхід може стати ефективним інструментом для раннього виявлення проблем слуху, що, у свою чергу, сприятиме своєчасному зверненню до фахівця та запобіганню ускладненням, пов'язаним з втратою слуху.

Список літератури:

1. WO2015044926A1 "AUDIOMETRY SYSTEM AND METHOD". URL: https://patentscope.wipo.int/search/en/WO2015044926
2. US20130060159A1 "Hearing screening application for mobile devices". URL: https://patentcenter.uspto.gov/applications/13598762
3. Audiometry. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Audiometry
4. Smartphone. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Smartphone
5. Steam Workshop. URL: https://steamcommunity.com/workshop/

Ovdiienko P.K., Lebedev D.Yu. RESEARCH OF HEARING SCREENING PROBLEMS IN EVERYDAY LIFE AND WAYS TO SOLVE THEM USING MOBILE TECHNOLOGIES

This study explores the issue of hearing screening in everyday life, with a particular focus on the challenges associated with early detection of hearing impairments among individuals who do not have regular access to professional, calibrated medical equipment. To address this, a review of modern patented solutions related to audiometric testing methods and hearing screening technologies has been conducted. The analysis of existing technological solutions made it possible to identify their key advantages, as well as reveal major shortcomings, especially when used outside of professional medical environments.

The aim of this research is to develop a conceptually new approach to organizing the hearing screening process by integrating mobile technologies that are widely used in daily life. Modern mobile devices, especially smartphones, are equipped with high-quality speakers, microphones, and substantial computing power, enabling the implementation of software with artificial intelligence components. Within this study, an innovative system in the form of a mobile application is proposed, designed for preliminary hearing testing at home without the need to visit medical facilities. The use of artificial intelligence methods ensures a personalized testing process, enhancing its accuracy, efficiency, and convenience for the end user.

The proposed solution demonstrates strong potential for establishing a new standard in the field of primary hearing screening. Further technical improvements to the system will contribute to increased accuracy and reliability of diagnostic results. In the long term, this opens up opportunities for widespread adoption of such technologies on a global scale, ensuring access to hearing screening for residents of remote, economically underdeveloped, or socially vulnerable regions. Thus, the presented system could become the foundation for a new paradigm of preventive otological diagnostics at the international level.

Key words: *smartphone, hearing screening, everyday life, audiometry, mobile application, artificial intelligence.*

УДК 621.382
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/12

Осадчук О.В.
Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.
Вінницький національний технічний університет

Петренко В.І.
Вінницький національний технічний університет

Скощук В.К.
Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ ОПОРОМ

У роботі запропоновано та досліджено нове схемотехнічне рішення генератору детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Забезпечення безпечної передачі даних у електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах має вирішальне значення для підтримки безпеки та реалізації повного потенціалу цих інфокомунікаційних технологій. Серед перспективних розробок у безпеці фізичного рівня в передачі даних є інтеграція теорії хаосу, яка підвищує безпеку, використовуючи властиву хаотичним сигналам непередбачуваність. Методи зв'язку на основі хаосу пропонують переконливе рішення для безпечної передачі даних, особливо в сенсорних мережах Інтернету речей, де пристрої мають обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси. У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності колектору біполярного транзистора та стоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом, а третя це струм індуктивності. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги живлення та керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. У порівняні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань (15,36…19,82 нс).

Ключові слова: *автогенератор, детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний диференційний опір, генератор детермінованого хаосу.*

Постановка проблеми. Зростаюче розширення систем і мереж Інтернету речей (IoT) трансформує традиційні середовища на розумні екосистеми в сучасному інформаційному світі [1, 2]. Такі системи включають дуже велику кількість сенсорів та перетворювачів вимірювальної інформації, які безперервно збирають та передають конфіденційні інформаційні потоки даних через мережі, забезпечуючи розширені функції в розумних містах, промисловій автоматизації, медицині та військовій техніці [3–5]. Однак суттєве розгортання пристроїв IoT створює суттєві проблеми безпеки передачі інформативних сигналів. Популярність пристроїв IoT підкреслює необхідність надійних методів та засобів безпеки захисту конфіденційних даних від несанкціонованого доступу [6, 7]. Забезпечення безпечної передачі даних

у електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах має вирішальне значення для підтримки безпеки та реалізації повного потенціалу цих інфокомунікаційних технологій [8–10]. У електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах передача даних вимагає безпечних методів захисту конфіденційної інформації від порушень. Типові підходи до безпеки передачі даних включають шифрування, туманні обчислення або програмно-визначені мережі (SDN), кожен з яких застосовується до певних рівнів архітектури електронно-комунікаційних та радіотехнічних систем та мереж [11, с. 191–229].

Шифрування є одним із найпоширеніших методів, який застосовується переважно на мережевому та прикладному рівнях [11, с. 202–203]. Використання симетричних та асиметричних алгоритмів шифрування основним недоліком яких є необхідні великі обчислювальні витрати, що може бути проблематичним для малопотужних пристроїв з обмеженими ресурсами. У деяких випадках для балансування компромісу між безпекою та ефективністю використовуються легкі протоколи шифрування [12–15].

Туманні обчислення підвищують безпеку інфокомунікаційних систем і мереж, забезпечуючи обробку даних у режимі реального часу ближче до межі мережі, зменшуючи затримку та дозволяючи шифрування, фільтрацію даних та виявлення загроз перед пересиланням пакетів даних на сервери [13, 14]. Цей підхід покращує безпеку передачі даних, особливо в середовищах, що потребують швидкого прийняття рішень; однак він також створює складнощі в управлінні розподіленими ресурсами та забезпеченні безпеки на кількох межових пристроях [4, 5, 6]. Однак, таке централізоване керування також створює можливість відмови, так, якщо центральний контролер буде зламано, то безпека всієї мережі може опинитися під загрозою [12–15].

Використовуючи випадковість та фізичні властивості каналу передачі, такі як інформація про стан каналу, безпека фізичного рівня підвищує загальну безпеку, не покладаючись на ресурсоємні криптографічні операції, що робить її особливо придатною для електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладів і систем з обмеженою обчислювальною потужністю. Такі методи, як штучне введення шуму та радіочастотне зчитування відбитків пальців, ще більше посилюють безпеку, перешкоджаючи підслуховуванню та автентифікації пристроїв на основі унікальних характеристик обладнання [13–16].

Серед перспективних розробок у безпеці фізичного рівня в передачі даних є інтеграція теорії хаосу, яка підвищує безпеку, використовуючи властиву хаотичним сигналам непередбачуваність. Методи зв'язку на основі хаосу пропонують переконливе рішення для безпечної передачі даних, особливо в сенсорних мережах Інтернету речей, де пристрої мають обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На відміну від традиційних методів безпеки на основі шифрування, системи зв'язку на основі хаосу спираються на прості аналогові генератори хаосу, що робить їх добре придатними для енергоефективних та легких реалізацій. Ці системи забезпечують безпечну передачу від малопотужних сенсорів до більших мережевих вузлів без необхідності складних операцій, вирішуючи ключові проблеми в середовищах електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладів і систем з обмеженими ресурсами [11–15]. Такі системи генерують хаотичні форми хвиль, що характеризуються високою чутливістю до початкових умов та шумоподібними формами хвиль, що робить їх ідеальними для кодування конфіденційної інформації. У таких реалізаціях передавач і приймач повинні досягти точної синхронізації для декодування переданих даних, забезпечуючи додатковий рівень безпеки. Будь-яке порушення синхронізації робить перехоплений сигнал нечитабельним, що значно ускладнює несанкціонований доступ [17, 18].

Хаотичні сигнали демонструють детерміновану аперіодичну поведінку, чутливість до початкових умов та широкий спектр, що робить їх дуже привабливими для комунікаційних застосувань та покращених систем безпеки [19, 20]. Хаотичні сигнали виникають, коли нелінійні осцилятори налаштовані на роботу в певних умовах, причому точно налаштовані номінали компонентів змушують систему переходити в хаотичну область [20]. Іншим важливим питанням застосування хаотичних сигналів у реальних застосуваннях є синхронізація, яка є процесом досягнення збігу хаотичних сигналів на стороні передавача та приймача для надійної та безпечної передачі даних [21]. Осцилятори хаосу являють собою нелінійну динамічну систему, яка генерує хаотичні сигнали, що відрізняються чутливістю до початкових умов та шумоподібними формами хвиль [22].

Ці осцилятори є критично важливими в захищених системах зв'язку, оскільки їхня хаотична природа використовується для забезпечення безпеки фізичного рівня в електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах.

Постановка завдання. Метою роботи є: розробка та дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Для досягнення поставленої мети у даній роботі потрібно розв'язати такі задачі:

1) провести аналіз літературних джерел та обґрунтувати використання транзисторних структур з диференційним від'ємним опором для побудови генератора детермінованого хаосу;

2) розробити математичну модель генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни напруги живлення та напруги керування з врахуванням основних параметрів всіх елементів генератора детермінованого хаосу;

3) провести експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу. Схемотехнічні рішення напівпровідникових генераторів детермінованого хаосу повинні бути достатньо простими, щоб їх можна було синхронізувати. Особливістю генерування та формування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або динамічних характеристик. Простота схемних рішень напівпровідникових генераторів детермінованого хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей в роботі електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладів, систем і мереж.

В ході аналізу вибору оптимального варіанта схемотехнічного рішення генератора детермінованого хаосу для електронно-комунікаційних та радіотехнічних пристроїв та систем, доцільно використовувати частотний метод перетворення інформаційного сигналу, який дозволяє підвищити вихідну потужність генератора хаосу, а також розширити частотний діапазон генерованого хаотичного сигналу. Теоретичні дослідження показали, що в якості схем автогенераторів детермінованого хаосу доцільно використовувати схемотехнічні рішення генераторних схем на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором [23–27], які реалізують частотний принцип перетворення інформативного сигналу. Принципово автогенераторні транзисторні структури з від'ємний диференціальним опором представляють собою транзисторний аналог негатрона, вольт-амперна характеристика яких має спадаючу ділянку, що відповідає від'ємному диференціальному опору. Даний від'ємний опір забезпечується внутрішнім зворотним зв'язком транзисторної структури і слугує компенсацією втрат енергії в коливальному контурі. Імпеданс такої транзисторної структури, в залежності від вигляду його вольт-амперної характеристики, носить ємнісний або індуктивний характер, а його величина залежить від напруги живлення та керування. При з'єднанні такої транзисторної структури з індуктивністю утворюється резонансний коливальний контур.

У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, електрична схема якого представлена на рис. 1. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності колектору біполярного транзистора VT1 та стоку двозатворного польового транзистора VT2 з індукованим каналом, а третя це струм індуктивності L1.

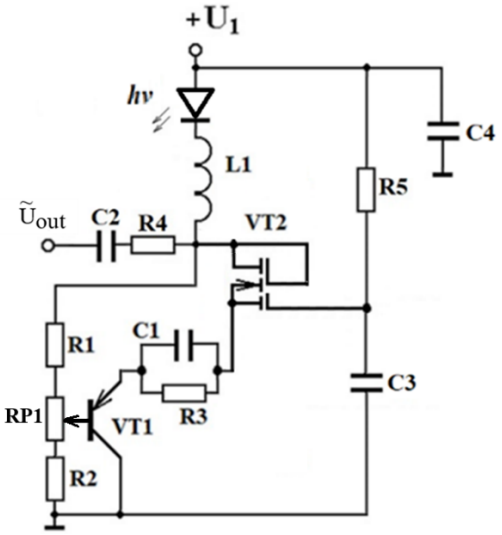
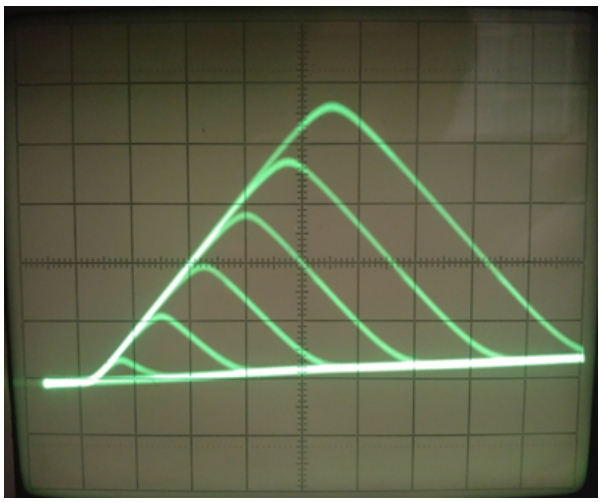


Рис. 1. Електрична схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури

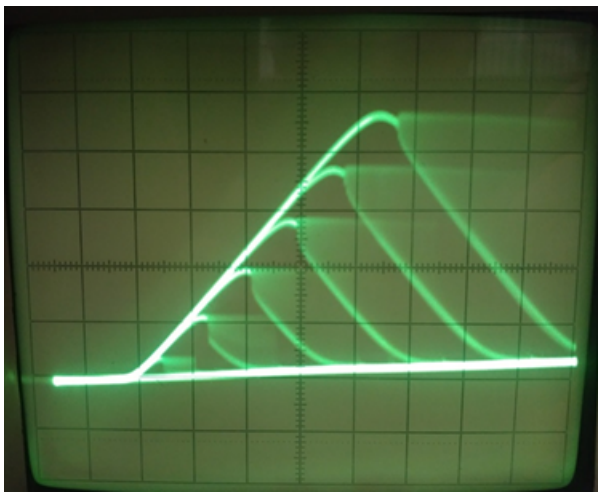
Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Для зміни динаміки хаотичних коливань, а також розширення фазового простору, додано послідовний ланцюг з резистора R5 та ємності C3, до індуктивної вітки базової схеми генератора на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором також додано коло з послідовно включених світловипромінюючим діодом. Для термостабілізації роботи генератора детермінованого хаосу введено ланцюг з паралельного включення ємності C1 та резистора R3. Номінали електронних компонентів обираються з наступних міркувань це забезпечення максимальної протяжності спадаючої ділянки статичної вольт-амперної характеристики транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором та забезпечення широкої зміни еквівалентної ємності самої транзисторної структури.

Генерована хаотична напруга знімається зі стоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом VT2. В даному випадку хаотична динаміка контролюється зміною напруги на базі біполярного транзистора підстроювальним резистором RP1. Під час підключення опору навантаження, необхідно враховувати внесений нею активний та реактивний опір до коливального контуру генератора хаоса на основі біполярно-польової транзисторної структури. Застосування світлодіоду дозволяє здійснити гальванічну розв'язку виходу генератору детермінованого хаосу з навантаженням. У цьому випадку генератор працює в режимі холостого ходу по основному виходу, що дозволяє широко його використовувати у схемах електронно-комунікаційних та радіотехнічних пристроїв та систем. Сімейство експериментальних статичних та динамічних вольт-амперних характеристик генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором подано на рис. 2.

Коло з резистора R5 та конденсатора C3 створює додатній зворотній зв'язок виходу генератора детермінованого хаосу з входом, що збільшує диференціальний від'ємний опір у коливальній системі пристрою. Конденсатор C4 запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги U1. Для аналізу статистичних характеристик генерованих хаотичних імпульсів розроблена математична модель, подальші обчислення якої здійснені в MATLAB R2018a.



а)



б)

Рис. 2. Сімейство експериментальних статичних (а) та динамічних (б) ВАХ генератора детермінованого хаосу (по вертикальній осі одна поділка – 1мА, а по горизонтальній осі – 1В)

Для побудови математичної моделі генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури застосовано метод змінних стану, який дозволяє визначити значення напруг і струмів елементів кола в кожний момент часу. З метою розгляду властивостей запропонованої схеми і створення її математичної моделі, було створено нелінійну еквівалентну схему. Обравши напрямки обходу контурів і позначивши відповідні струми, розроблено систему рівнянь за законами Кірхгофа (її різновиду – методу контурних струмів). Отриману систему рівнянь використано для аналізу схеми методом змінних стану.

Хаотичну поведінку генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової

транзисторної структури можна математично охарактеризувати набором диференціальних рівнянь, заснованих на його схемі.

$$\begin{cases} C_d \dfrac{dU_{C_d}(t)}{dt} = \dfrac{U_{C_s}(t) - U_{C_{SD}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}, \\ C_C \dfrac{dU_{C_C}(t)}{dt} = \dfrac{U_{C_e}(t) - U_{C_{SD}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} + I_{bt} - I_{dr}, \\ C_e \dfrac{dU_{C_e}(t)}{dt} = A_1 + I_{bt} - I_{dr}, \\ C_s \dfrac{dU_{C_s}(t)}{dt} = -I_{pt} - \dfrac{U_{C_{SD}}(t)}{R_{ds}} + A_3, \\ L \dfrac{di_L(t)}{dt} = U_2 - i_L(t) \cdot R_4 - \dfrac{U_{C_e}(t) + U_{C_C}(t) + U_{C_s}(t)}{R_e + R_s}, \\ C_{SD}(t) \dfrac{dU_{C_{SD}}(t)}{dt} = \dfrac{U_{C_d}(t)}{R_d} + I_{pt} - \dfrac{U_{C_s}(t) - U_{C_{SD}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} + \dfrac{U_{C_{SD}}(t)}{R_{ds}}. \end{cases} \quad (1)$$

де L – індуктивність коливального контуру; R_{VD} – внутрішній опір світловипромінюючого діода; R_1, R_2 і R_3 – навантажувальні опори переходів стік–витік і база–колектор біполярного транзистора; R_{ds} – об'ємний опір каналу двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; R_d – об'ємний опір стоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; R_s – об'ємний опір витоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; R_e – об'ємний опір емітера біполярного транзистора; R_c – об'ємний опір колектора біполярного транзистора; R_b – об'ємний опір бази біполярного транзистора; C_e, C_c – ємності емітерного і колекторного переходів біполярного транзистора; C_s, C_d – ємності затвор–витік та затвор–стік двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; C_{SD} – ємність каналу двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; I_f, I_r – прямий і зворотній струм біполярного транзистора; I_{dr}, I_{df} – струми внутрішніх переходів база-колектор та база-емітер біполярного транзистора; I_{pt} – струм каналу двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; U_1 – джерело живлення.

З огляду на те, що система рівнянь (1) містить в собі доданки, які описують нелінійні елементи (джерела струму), то система є нелінійною. Нелінійні елементи схеми описують струми нелінійних внутрішніх джерел елементів схеми. Прямий і зворотний струми переходів біполярного транзистора описуються рівняннями (2) [28, с. 243–258]:

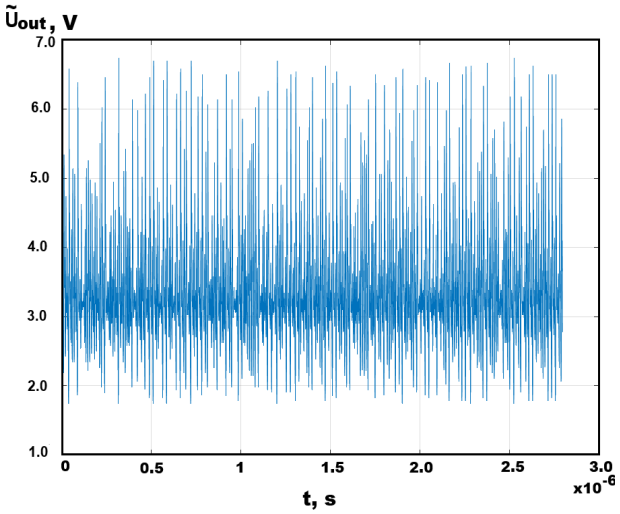
$$I_f = I_s \left(e^{\frac{U_{BE}}{UT \cdot NF}} - 1 \right); \quad I_r = I_s \left(e^{\frac{U_{BK}}{UT \cdot NR}} - 1 \right). \quad (2)$$

Струми внутрішніх переходів біполярного транзистора база-емітер і база-колектор описуються рівняннями (3):

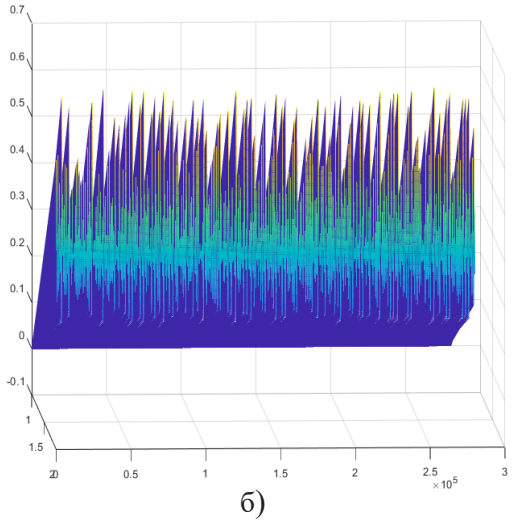
$$I_{DF} = \frac{I_f}{BF}; \qquad I_{DR} = \frac{I_r}{BR}, \quad (3)$$

де BF, BR – максимальні коефіцієнти передачі струму за схемою ввімкнення спільний емітер.

Динамічна модель генератора детермінованого хаосу (система рівнянь (1)) дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-який момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. На рис.3 представлено промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу.



а)



б)

Рис. 3. Промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу а) 2D; б) 3D

За допомогою Signal Processing Toolbox проведено спектральний аналіз розробленого генератора детермінованого хаоса, які дозволяють характеризувати частотний склад сигналу. Непараметричні методи на основі швидкого перетворення Фур'є, параметричні та підпросторові методи враховують попереднє знання сигналу і достатньо точно описують поведінку генератора детермінованого хаоса на основі біполярно-польової транзисторної структури. Обчислені спектри потужності нерівномірно дискретизованих сигналів представлені на рис. 3. Промодельована подібність сигналу у частотній області, оцінюючи їх спектральну когерентність, що дозволило візуалізувати та порівняти часово-частотний склад нестаціонарних сигналів. Отримано точні спектральні оцінки за допомогою перепризначення та синхронізаційного стискання Фур'є. На рис. 4 представлені крос-спектрограми, розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції. Оцінено спектральну потужність в часово-частотному представленні сигналу (рис. 5), миттєву частоту, миттєву ширину смуги пропускання (рис. 6), спектральний ексцес та спектральну ентропію.

Фундаментальна характеристика динамічного хаотичного сигналу, а саме подібність до розширеного спектру, має кілька корисних властивостей для електронно-комунікаційних та радіотехнічних систем [29]. Загалом, його наявність важко виявити, і, отже, його легко приховати від неавторизованих приймачів. Крім того, важко перехопити переданий хаотичний сигнал, і він стійкий до глушіння [29, 30]. Крім того, він пропонує певну стійкість до спотворень через багатопроменеве поширення, що можна пояснити нижчою взаємною кореляцією між двома зміщеними в часі сегментами хаотичної форми сигналу порівняно з періодичними сигналами [29]. Генеруючий хаотичний широкосмуговий сигнал має щільний набір нестабільних періодичних орбіт, які пропонують діапазон частот, що утворюють плоску функцію щільності ймовірності, що означає, що хаотичні системи використовують вхідну енергію для генерації шумоподібних широкосмугових сигналів. Це гарна властивість для передавального сигналу, особливо якщо врахувати вхідну енергію, що забезпечується зовнішніми збуреннями, а саме мультиплікативним шумом, присутнім у каналі передачі, тому були проведені

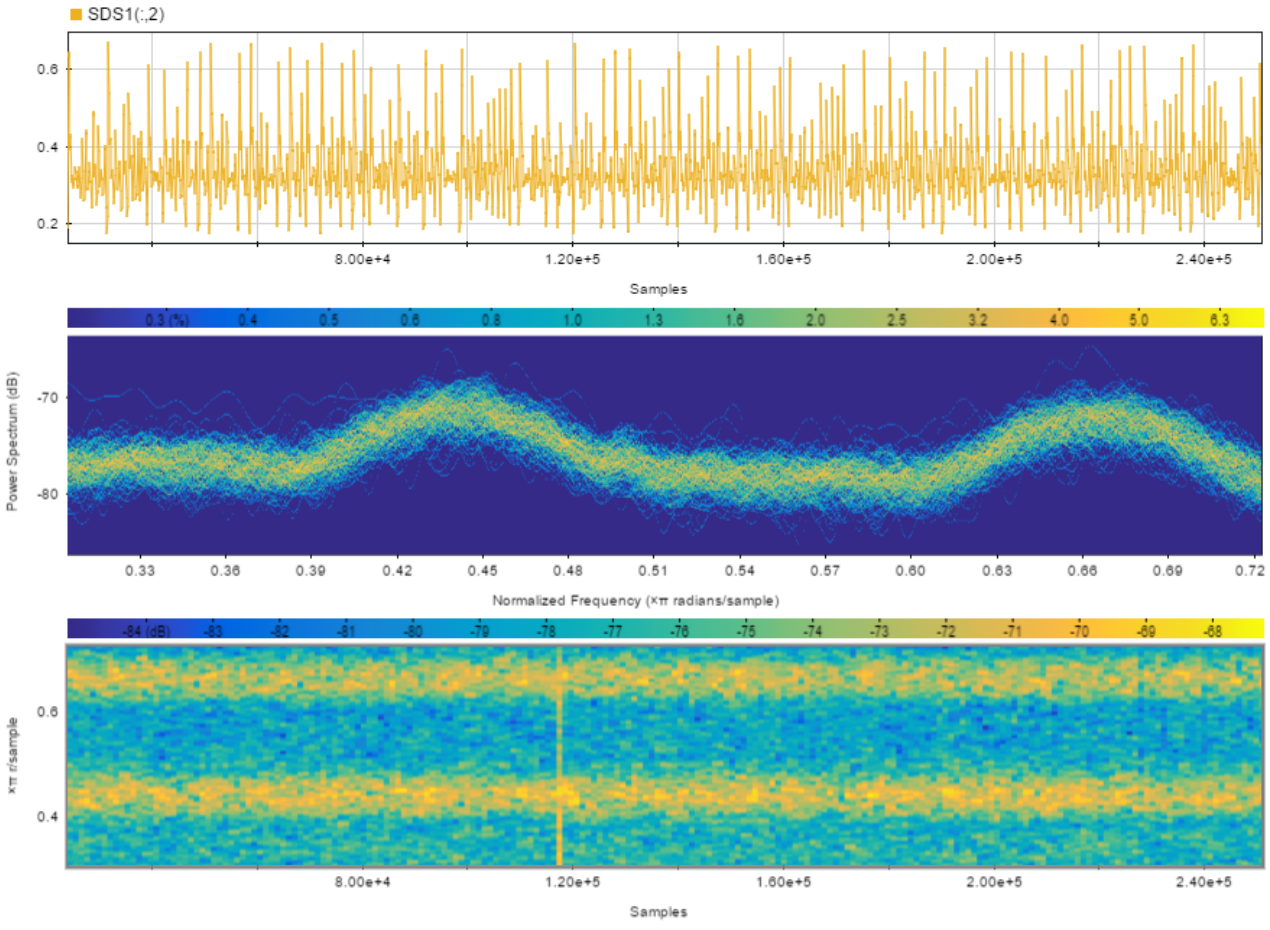


Рис. 4. Крос-спектрограми розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції

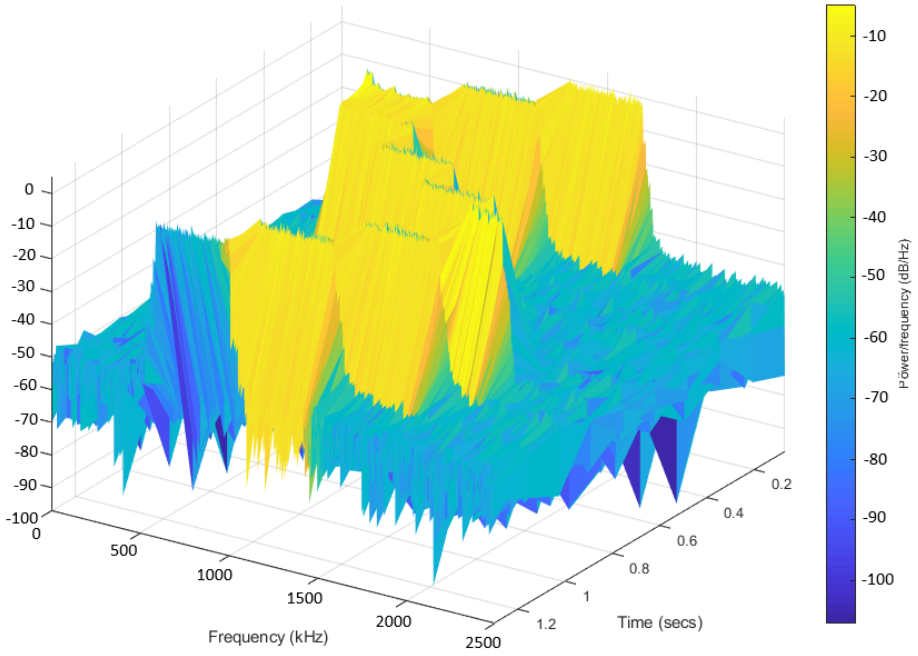


Рис. 5. 3D спектральна потужність в часово-частотному представленні сигналу

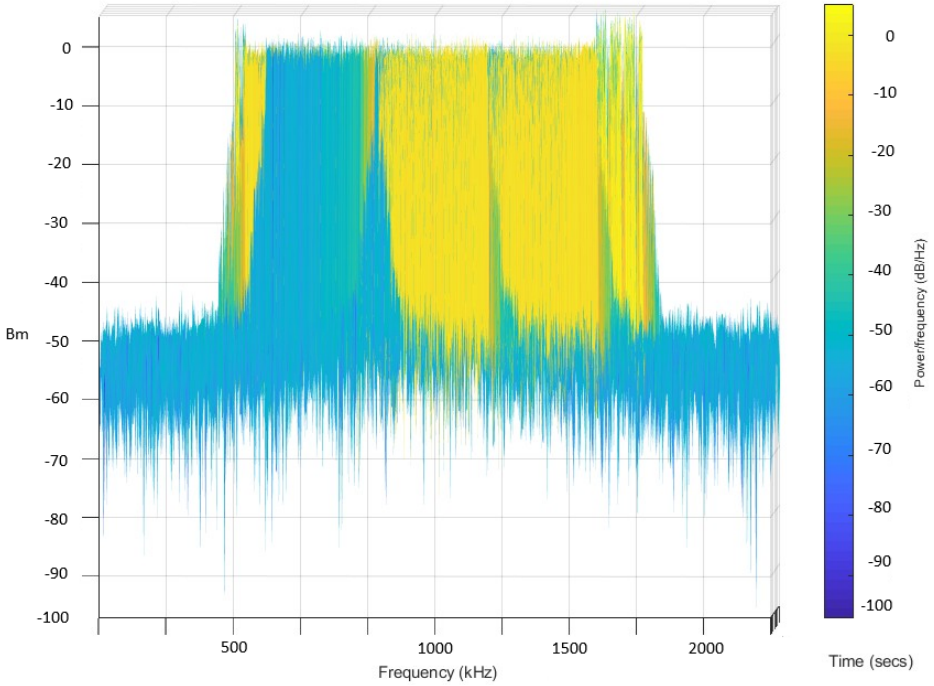
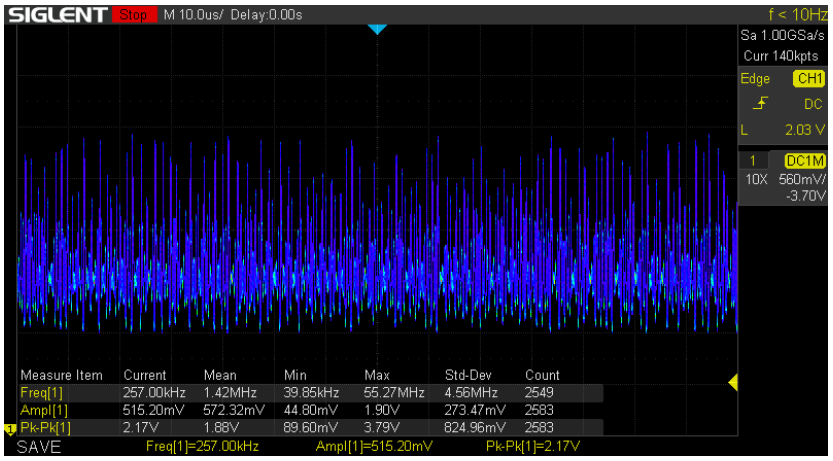


Рис. 6. Миттєва ширина смуги пропускання в часово-частотному представленні сигналу

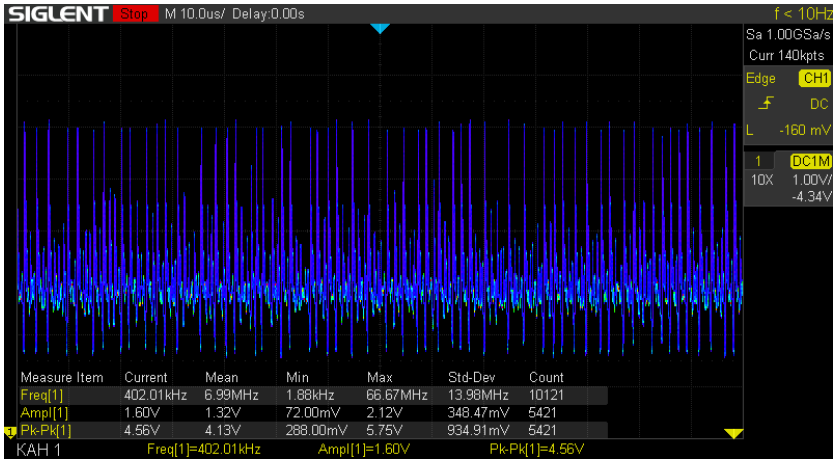
експериментальні дослідження спектрів вихідного сигналу генератора хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором.

Проведені експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором показали, що дане схемотехнічне рішення дозволяє зменшити час встановлення стаціонарних коливань та розширити частотний діапазон хаотичних коливань. Дане схемотехнічне рішення має малий час встановлення стаціонарних коливань (15,36…19,82 нс). На рис. 7 представлено фазовий портрет генератора у площині динамічних змінних. На рис. 8 наведені експериментальні осцилограми хаотичних коливань генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури.

Рис. 7. Фазовий портрет генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури у площині динамічних змінних



а)



б)

Рис. 8. Осцилограми генератора детермінованого хаосу: а) напруга живлення 5 В, напруга керування 2,5 В; б) напруга живлення 5 В, напруга керування 3,5 В

Висновки. У роботі запропоновано та досліджено нове схемотехнічне рішення генератору детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності колектору біполярного транзистора та стоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом, а третя це струм індуктивності. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги живлення та керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. У порівняні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань (15,36…19,82 нс).

Список літератури:

1. Sun P., Shen S., Wan Y., Wu Z., Fang Z., Gao X.Z. A Survey of IoT Privacy Security: Architecture, Technology, Challenges, and Trends. *IEEE Internet Things J.* 2024, 11, 34567–34591.
2. Sauter T., Treytl A. IoT-Enabled Sensors in Automation Systems and Their Security Challenges. *IEEE Sensors Lett.* 2023, 7, 1–4.
3. Cirjulina D., Babajans R., Kolosovs D. Design Particularities of Quadrature Chaos Shift Keying Communication System with Enhanced Noise Immunity for IoT Applications. *Entropy*. 2025; 27 (3) : 296.
4. Hussain F., Hussain R., Hassan S.A., Hossain E. Machine Learning in IoT Security: Current Solutions and Future Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 2020, 22, 1686–1721.
5. Capligins F., Litvinenko A., Kolosovs D. FPGA Implementation and Study of Antipodal Chaos Shift Keying Communication System. *In Proceedings of the 2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications* (MTTW), Riga, Latvia, 7–8 October 2021.
6. Kaddoum G., Tadayon N. Differential Chaos Shift Keying: A Robust Modulation Scheme for Power-Line Communications. *IEEE Trans. Circuits Syst. II* 2017, 64, 31–35.
7. Rawat D.B., Doku R., Garuba M. Cybersecurity in Big Data Era: From Securing Big Data to Data-Driven Security. *IEEE Trans. Serv. Comput.* 2021, 14, 2055–2072.
8. Michaels A.J. A maximal entropy digital chaotic circuit. *In Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems* (ISCAS), Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 May 2011; IEEE: Piscataway NJ, USA, 2011; P. 717–720.
9. Lin Y., Xie Z., Chen T., Cheng X., Wen H. Image privacy protection scheme based on high-quality reconstruction DCT compression and nonlinear dynamics. *Expert Syst. Appl.* 2024, 257, 124891.
10. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświęcimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż. *CHAOS.* 017. Vol. 27, 073113 (2017). P. 073113-1 – 073113-13.
11. Saber A. Security Analysis of Chaos Based Communication Systems; Carleton University: Ottawa, ON, Canada, 2007.
12. Litvinenko A., Aboltins A., Pikulins D., Eidaks J. Frequency Modulated Chaos Shift Keying System for Wireless Sensor Network. *In Proceedings of the 2020 Signal Processing Workshop*, SPW, Warsaw, Poland, 5–7 October 2020.
13. Rahman Z.-A.S.A., Jasim B.H., Al-Yasir Y.I.A., Abd-Alhameed R.A. Efficient Colour Image Encryption Algorithm Using a New Fractional-Order Memcapacitive Hyperchaotic System. *Electronics* 2022, 11, 1505.
14. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
15. Petrzela J., Polak L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-immittance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
16. Valencia-Ponce M.A., Tlelo-Cuautle E., Gerardo de la Fraga L. Estimating the highest time-step in numerical methods to enhance the optimization of chaotic oscillators. *Mathematics* 2021, 9, 1938.
17. Hanias M. P. Chaotic Behavior of Transistor Circuits / M. P. Hanias, H. E. Nistazakis, G. S. Tombras // Chapter 4 in Understanding Complex Systems, July 2012. P. 59–91.
18. Babajans R., Cirjulina D., Capligins F., Kolosovs D., Grizans J., Litvinenko A. Performance Analysis of Vilnius Chaos Oscillator-Based Digital Data Transmission Systems for IoT. *Electronics*. 2023; 12 (3): 709.

19. Tjukovs S., Eidaks J., Pikulins D. Experimental Verification of Wireless Power Transfer Ability to Sustain the Operation of LoRaWAN BasedWireless Sensor Node. *In Proceedings of the IEEE 2018 Advances inWireless and Optical Communications* (RTUWO 2018), Latvia, Riga, 15–16 November 2018.

20. Kekha Javan, A.A.; Shoeibi, A.; Zare, A.; Hosseini Izadi, N.; Jafari, M.; Alizadehsani, R.; Moridian, P.; Mosavi, A.; Acharya, U.R.; Nahavandi, S. Design of adaptive-robust controller for multi-state synchronization of chaotic systems with unknown and time-varying delays and its application in secure communication. *Sensors* 2021, 21, 254.

21. Cirjulina D., Pikulins D., Babajans R., Zeltins M., Kolosovs D., Litvinenko A. Experimental Study on FM-CSK Communication System for WSN. *Electronics*. 2022; 11 (10) : 1517.

22. Capligins F., Litvinenko A., Kolosovs D. FPGA Implementation and Study of Antipodal Chaos Shift Keying Communication System. In Proceedings of the 2021 *IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications* (MTTW), Riga, Latvia, 7–8 October 2021.

23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Piotr Kisała, Karlygash Nurseitova. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 111761I, 2019. P. 1–12.

24. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal.* Vol. 13 No 4, 2021. 04001. 6 p.

25. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode. *Physics and chemistry of solid state*. V. 23, No. 2 (2022) P. 277–284.

26. Osadchuk I.A., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O. Optical Sensor with Frequency Output Based on Resonant Tunneling Diode. *Proceedings – 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering,* TCSET 2022, 2022, P. 442–446.

27. Osadchuk V., Osadchuk A., Semenov A., Osadchuk I., Semenova O., Baraban S., Prytula M.. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Data-Centric Business and Applications ICT Systems-Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity,* (Volume 5). Chapter 12. Springer International Publishing. Cham. Editors: Tamara Radivilova, Dmytro Ageyev, Natalia Kryvinska. 2020, P. 229–261.

28. Sze S.M. and Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices Wiley-Interscience, USA. 2007.

29. Marc M. Sepantaie, Nader M. Namazi, and Amir M. Sepantaie. Spectral analysis and implementation of secure chaotic free-space optical communication systems. *Optical Engineering* 57 (10), 106101 (5 October 2018).

30. Kaushal H., Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques. *IEEE Commun. Surv. Tutorials,* 19 (1). 2017. P. 57–96.

Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Petrenko V.I., Skoshchuk V.K. RESEARCH OF A DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE

The paper proposes and investigates a new circuit solution for a deterministic chaos generator based on a bipolar field-effect transistor structure with negative differential resistance. Ensuring secure data transmission in electronic communication and radio engineering devices and systems is crucial for maintaining security and realizing the full potential of these infocommunication technologies. Among the promising developments in physical-level security in data transmission is the integration of chaos theory, which increases security by using the unpredictability inherent in chaotic signals. Chaos-based communication methods offer a compelling solution for secure data transmission, especially in sensor networks of the Internet of Things, where devices have limited computing and energy resources. The paper considers the possibility of obtaining a chaotic mode in a semiconductor generator based on a bipolar field-effect transistor structure with negative differential resistance. This chaos generator system has three dynamic variables: the voltage at the equivalent capacitance of the collector of a bipolar transistor and the drain of a two-gate field-effect transistor with an induced channel, and the third is the inductance current. The dynamic processes of deterministic chaos are determined by the reactive properties of a transistor structure with negative differential resistance. A mathematical model of a deterministic chaos generator has been developed in the form of a system of first-order differential equations based on the state variable method, which allows determining the value of the output signal frequency depending on the supply and control voltages, as well as the parameters of the main elements of the oscillator at any point in the circuit at a given time. Using the MATLAB program package, a computer circuit engineering study of the parameters and characteristics of the generated electrical oscillations in a chaotic mode has been carried out. Compared to analogues, the proposed and investigated deterministic chaos generator has improved load capacity and higher speed, has a short time for establishing stationary oscillations (*15.36…19.82 ns*).

Key words: *oscillator, deterministic chaos, transistor structure, negative differential resistance, deterministic chaos generator.*

УДК 621.37(045)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/13

Тачиніна О.М.
Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Слободян О.П.
Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Єнчев С.В.
Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Тачинін Є.В.
АТ «Антонов»

ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ НИЗЬКОЛІТАЮЧИХ ЦІЛЕЙ ОГЛЯДОВОЮ РАДІОЛОКАЦІЙНОЮ СТАНЦІЄЮ

Виявлення та супровід низьколітаючих цілей здійснюється оглядовою радіолокаційною станцією. При цьому виникає ціла низка наукових, технічних та інженерних проблем, які потрібно вирішувати на етапах проектування й експлуатації радіолокаційної системи. На ефективність виявлення цілі радіолокаційною станцією впливають фізичні явища, які пов'язані з поширенням радіохвиль над поверхнею, технічні й технічні характеристиками низьколітаючих цілей, технічною реалізацією методів і пристроїв, що суттєво впливають на ефективність радіолокаційної станції щодо виявлення цілі. Однією з таких є актуальна наукова задача, що полягає у визначенні дальності виявлення низьколітаючої цілі радіолокаційною станцією з врахуванням фізичних явищ і тактико-технічних характеристик цілі. У статті досліджено вплив таких фізичних явищ: обмеження радіогоризонтом максимальної дальності виявлення через прямолінійне поширення радіохвиль; інтерференційні явища; маскування сигналу від цілі потужними відбиттями зондувального сигналу від підстилаючої поверхні; маскування сигналу від цілі подібними сигналами відбиття від атмосферних неоднорідностей на межі між підстилаючою поверхнею й атмосферою. Встановлено причини та досліджено траєкторії завад типу «ангел-відлуння» в системі координат дальність-пеленг. Проаналізовані та визначені залежності дальності від висоти установки антени, висоти цілі, ефективної площі розсіювання, довжини хвилі радіосигналів, потужності радіоімпульсу, діаграми спрямованості антени та температури зовнішнього повітря для моделей плоскої та сферичної Землі. Визначено залежності множника ослаблення від дальності та висоти цілі для моделей плоскої та сферичної Землі. Побудовані зони виявлення низьколітаючих цілей у нижньому промені діаграми спрямованості антени за моделлю сферичної Землі для різних висот установки антени, довжин хвиль радіосигналу, дальності радіогоризонту, ширини та кута установки променю. Запропоновані формули дозволяють розрахувати зони та дальності виявлення низьколітаючих цілей.

Ключові слова: *радіолокаційна станція, низьколітаюча ціль, дальність виявлення, зона виявлення, ефективна поверхня розсіювання.*

Постановка проблеми. При виявленні та супроводі низьколітаючих цілей (НЛЦ) оглядовою радіолокаційною станцією (РЛС) виникає ціла низка наукових, технічних та інженерних проблем, які потрібно вирішувати як на етапі її проектування, так і при використанні готової РЛС [1, 3, 6–8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність виявлення НЛЦ оглядовою РЛС залежить від вирішення проблем, які зумовлені [6–8]:

– фізичними явищами, пов'язаними з поширенням радіохвиль над поверхнею;

– технічними і тактичними характеристиками НЛЦ;

– сучасними можливостями технічної реалізації методів і пристроїв, що підвищують ефективність РЛС щодо виявлення НЛЦ.

Розглянемо докладніше кожне із названих вище обмежень. Як основні фізичні явища, що впливають на дальність виявлення НЛЦ, можна назвати такі:

– обмеження радіогоризонтом максимальної дальності виявлення через прямолінійне поширення радіохвиль;

– інтерференційні явища;

– маскування сигналу від цілі потужними відбиттями зондувального сигналу від підстилаючої поверхні;

– маскування сигналу від цілі подібними сигналами відбиття від атмосферних неоднорідностей на межі між підстилаючою поверхнею й атмосферою [4].

До технічних і тактичних характеристик НЛЦ, які в першу чергу необхідно враховувати під час проектування РЛС, слід віднести [3, 7]:

– ефективну поверхню розсіювання цілей, що лежить у межах $\sigma = 0{,}03...0{,}1$ м^2;

– висоту польоту над підстилаючою поверхнею порядку 10...15 м і нижче;

– швидкість польоту до 700...1000 м/с.

Постановка завдання. Таким чином, мета статті полягає оцінці дальності визначення НЛЦ оглядовою РЛС з врахуванням фізичних явищ і тактико-технічних характеристик цілі.

Виклад основного матеріалу. Для визначення можливостей технічної реалізації методів та пристроїв розглянемо вплив зазначених фізичних явищ сукупно з тактико-технічними характеристиками (ТТХ) НЛЦ. Як правило, при оцінці РЛС першим з усіх параметрів розглядається дальність виявлення НЛЦ [2, 4].

Дальність виявлення НЛЦ при лінійному поширенні радіохвиль у разі відсутності рефракції та надрефракції не перевищує величини дальності радіогоризонту [2]:

$$R_{\text{НЛЦ}} \le D_{\text{г}} = 4{,}12\left(\sqrt{h_{\text{а}}} + \sqrt{h_{\text{НЛЦ}}}\right),$$

де $R_{\text{НЛЦ}}$ – дальність виявлення НЛЦ, км; $D_{\text{Г}}$ – дальність радіогоризонту (км) або дальність прямої видимості; $h_{\text{а}}$ – висота установки антени, м; $h_{\text{НЛЦ}}$ – висота польоту НЛЦ.

Дальність виявлення НЛЦ менша дальності радіогоризонту за рахунок інтерференційних явищ при поширенні радіохвиль над підстилаючою поверхнею. Відомо, що інтерференція призводить до порізаності діаграми спрямованості антени РЛС (ДСА) у вертикальній площині та формуванню уздовж підстилаючої поверхні інтерференційного мінімуму [11]. Тому нижній пелюсток діаграми віджимається від підстилаючої поверхні, на кут $\varepsilon_1 = \lambda/4h_{\text{а}}$, де λ довжина хвилі РЛС. А відповідно цілі, що летять на дуже низькій висоті, потрапляють у мінімум ДСА і не можуть бути виявлені на дальностях, які рівні або навіть менші за дальність радіогоризонту.

На рис. 1 представлена типова зона виявлення РЛС з діаграмою спрямованості, яка перетинається з підстилаючою поверхнею. Тут R_0 – дальність у вільному просторі.

На рис. 1 діаграма спрямованості, яка є зоною видимості РЛС без врахування підстилаючої поверхні, позначена міткою 1. Зона видимості з урахуванням інтерференційних явищ позначена міткою 2. Зменшити ширину першого мінімуму за кутом місця ε_1 можна шляхом збільшення висоти установки антени за заданої довжини хвилі λ.

Наприклад, РЛС 76N6 для виявлення НЛЦ, що працює в X діапазоні, забезпечує дальність виявлення $R_{\text{НЛЦ}} \cong D_{\text{г}}$ шляхом розміщення антени на спеціальній вежі заввишки близько 38 м [10]. Є станції, які розміщуються на дирижаблях,

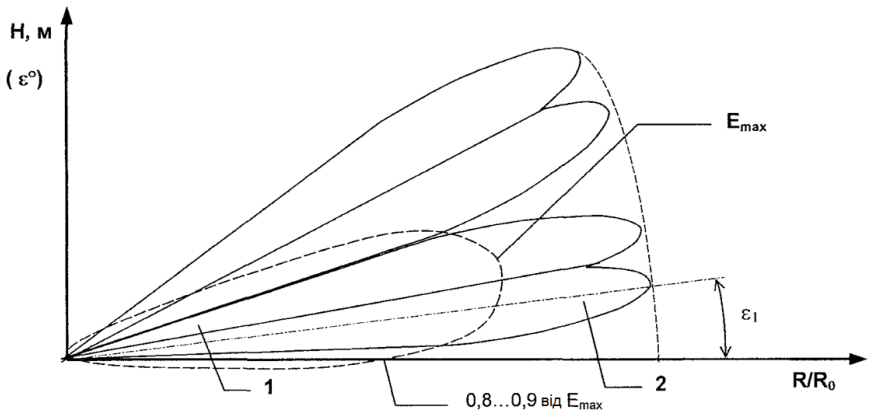


Рис. 1. Зона виявлення РЛС

наприклад, РЛС AN/TPЗ-63 фірми Westinghouse з λ = 23 см [2]. А можна РЛС розмістити просто на височині, проте ця можливість доступна тільки для РЛС наземного базування.

Для корабельних РЛС висота установки антени визначається, як правило, водотоннажністю корабля. Так, для кораблів малої водотоннажності (до 1000 т) $h_a \approx$ 8...10 м, а для кораблів середньої та великої водотоннажності $h_a \approx$ 15...20 м [2]. Для порівняно низьких висот установки антени близько 8...15 м дальність виявлення НЛЦ з урахуванням відтискання діаграми спрямованості від горизонту складає 0,5...0,7 від дальності радіогоризонту.

Тому, якщо прийняти висоту установки антени $h_а \approx$ 9 м, а $R_{НЛЦ}$ = 4 м, то $D_г \approx$ 20 км, а дальність виявлення НЛЦ становитиме $R_{НЛЦ} \approx$ 10...14 км. Така дальність є типовою для випадку розміщення РЛС на катерах берегової охорони та інших типах поширених кораблів і призводить до істотного скорочення часу приведення в готовність засобів захисту об'єкта [11].

При швидкості сучасних низьколітаючих цілей понад 500 м/с підлітний час для $R_{НЛЦ} \approx$ 14 км становить близько 28 с. Причому в цей інтервал часу входить час, витрачений на виявлення, час обробки траєкторних даних, час видачі цілевказівки, час захоплення цілі станцією супроводу, і навіть підготовку зброї (розворот, наведення, передстартова підготовка тощо).

Розглянемо вплив маскуючого ефекту відбиття від підстилаючої поверхні на процес виявлення НЛЦ. Як видно з рис. 1, при виявленні НЛЦ діаграму спрямованості антени «притискають» до підстилаючої поверхні.

Якщо позначити E_{max} максимальне значення діаграми спрямованості електричним полем, то діаграма неначе лежить максимумом на поверхні (80...90% від E_{max}) [6]. Однак результуюча діаграма 2, залишається відтиснутою від поверхні на кут ε_1. Так як НЛЦ виявляється на відстані близько 50...70% від $D_г$, то при сильному хвилюванні моря дальність її виявлення можна порівняти з максимальною дальністю зони відбиття від морської поверхні. Тоді ціль, яка була виявлена у вільній від перешкод зоні, через короткий проміжок часу потрапляє до зони перешкод (рис. 2).

Враховуючи, що ефективна площа розсіювання (ЕПР) цілі мала і становить приблизно 0,03...0,1 м^2, відношення сигналу до завади виявляється досить низьким

$$\frac{P_с}{P_з} = k\frac{\sigma_ц}{\sigma_з} << 1$$

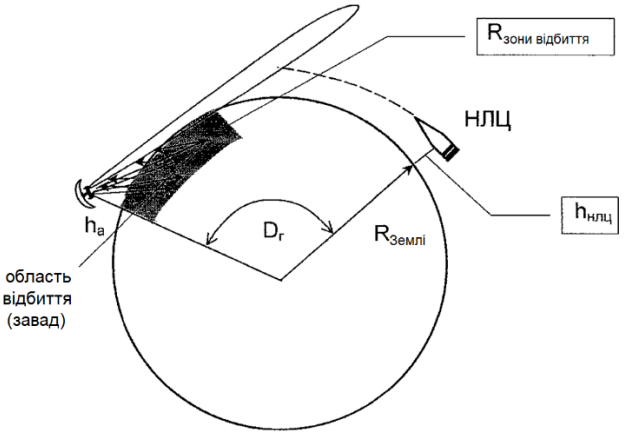


Рис. 2. Утворення області відбиття (завад)

і може досягати величини -25...-35 дБ. У цьому разі для досягнення високої ймовірності виявлення необхідно забезпечити придушення завад у межах 40...60 дБ [11].

Мала ефективна поверхня розсіювання НЛЦ, вимагає збільшення потенціалу РЛС, але при цьому в її ближній зоні починають проявлятися атмосферні ефекти, які були менш помітними у звичайних РЛС. Це, передусім, відбиття від атмосферних неоднорідностей, що оптично не спостерігаються, відображення, викликані турбулентністю атмосфери, а також відбиття від зграй птахів, скупчень комах та ін. Збірна назва цих відображень «ангел-відлуння» [2].

Складність фільтрації сигналів, відбитих від «ангел-відлуння», у тому, що явища, які призводять до віддзеркалення, є різними за своєю фізичною суттю. Тому єдиних методів їхнього придушення не існує [2].

Поступальні швидкості пересування таких позначок від «ангел-відлуння» часто можна порівняти зі швидкістю вітру, а при їх переміщенні у вертикальній площині відстань до них не змінюється. Здавалося б, такі позначки могли бути компенсовані системою детектування цілі (СДЦ). Однак крім поступального руху в горизонтальній або вертикальній площині частина «ангел-відлуння» може мати швидкий обертальний або коливальний рух, що призводить до доплерівського зміщення, еквівалентного швидкісних цілей або широкого спектра доплерівського. Таким чином, окремі позначки від «ангел-відлуння» проходять через пристрої СДЦ і виділяються як цілі [2]. Явища «ангел-відлуння» залежать від сезону, вологості, температури і досить інтенсивно проявляються межі «море-атмосфера» чи «Земля-атмосфера», тобто у зоні НЛЦ.

На фото рис. 3 представлені траєкторії одного з різновидів «ангел-відлуння» в системі координат дальність-пеленг, зняті відкритою фотокамерою з екрану РЛС протягом декількох десятків секунд [2]. у даному випадку позначки від «ангел-відлуння» рухаються в просторі поступово. Як видно, траєкторії стійкі, позначки регулярно зміщуються від огляду до огляду. Фотокамера була відкрита протягом часу $T_2 = T_{\text{огл.}}\left(N-1\right)$, де N кількість оглядів.

З короткого аналізу видно, що для вирішення проблеми виявлення НЛЦ необхідно провести цілу низку досліджень, пов'язаних з оцінкою ефективності існуючих методів виявлення, і виробленням загальних критеріїв і методів для проектування подібних РЛС.

Вище вказувалося, що зазвичай дальність виявлення НЛЦ не перевищує дальності радіогоризонту і може становити близько 50%...70% від неї в залежності від висоти установки антени, а також висоти польоту цілі [11]. Для наземних РЛС можна досягти дальності виявлення, порівнянної з дальністю радіогоризонту шляхом вибору оптимальної висоти установки її антени.

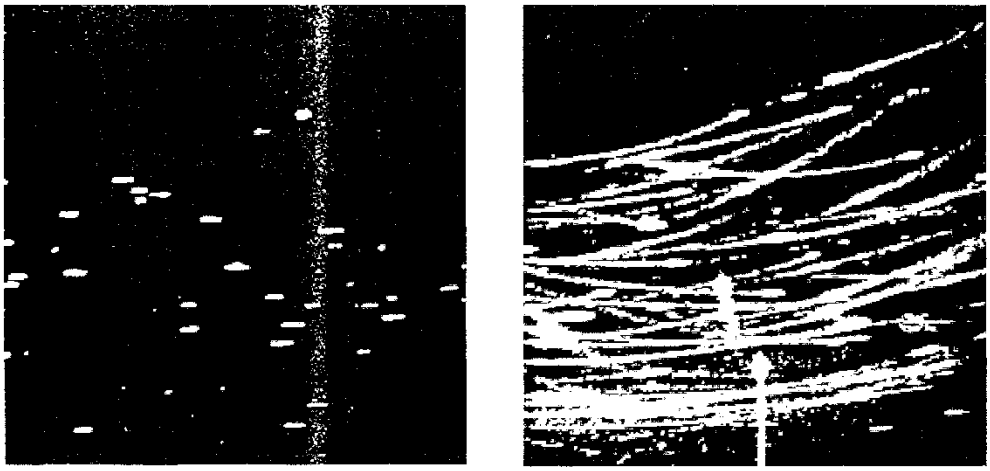
При роботі РЛС у нижній зоні за рахунок багатопроменевого поширення радіохвиль виникають інтерференційні явища. У цьому випадку відбувається когерентне додавання полів: прямого від цілі до РЛС і непрямого, що виникає в результаті відбиття від підстилаючої поверхні [5].

Це та інші явища, пов'язані з поширенням радіохвиль над підстилаючою поверхнею враховуються при розрахунку множника ослаблення $|F|$. Зважаючи на сферичну форму Землі, простір над земною поверхнею, в якому поширюються радіохвилі, ділять на три характерні області, показані на рис. 4 [1, 6]:

a) освітлену область;

b) тіньову область;

c) напівтіньову область, розташовану між освітленою та тіньовою.



а *б*

Рис. 3. Явище «ангел-відлуння»: а – вигляд позначок перед початком вимірювань; б – траєкторії тривалого спостереження

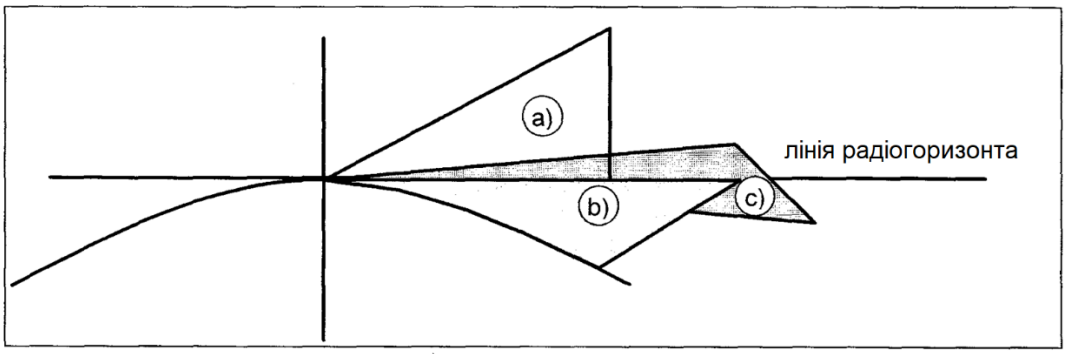


Рис. 4. Характерні області поширення радіохвиль зумовлені сферичністю Землі

Освітлена область характеризується тим, що в ній до дальності радіогоризонту значна частина енергії передається прямими променями джерела випромінювання [1, 6].

Тіньова область повністю розташована нижче за лінію радіогоризонту.

В освітленій області поверхнева хвиля визначається інтерференцією між прямою і відбитою хвилею. В областях півтіні та тіні поширення обумовлено обгинанням радіохвилями земної поверхні дифракцією. Тому ці області найчастіше поєднуються в одну дифракційну область. Виявлення цілей, що низько летять, як правило, відбувається в освітленій області [2].

Врахування півтіньової області при розрахунках дальності виявлення НЛЦ як правило не надає істотного впливу на результат за винятком хвилеводного поширення радіохвиль. Тому оцінку дальності, щоправда дещо занижену, можна проводити в інтерференційній зоні [1, 6].

При розв'язанні задачі визначення дальності НЛЦ з використанням множника ослаблення будемо враховувати відомі положення про те, що для будь-яких кутів місця при горизонтальній поляризації, а також для кутів місця, менше 1° при вертикальній поляризації, для λ < 1,5 м над морем і для λ < 10 м над сушею, модуль коефіцієнта відбиття ≈ 1, а фаза відбиття – 180° [2, 10, 14].

За цих умов множник ослаблення можна записати у вигляді:

$$F \cong f\left(\theta_1\right)\sqrt{1+m^2+2m\cdot\cos\left(\varphi+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r\right)}. \quad (1)$$

У виразі (1) $m=\rho D_{\text{р}}$, де $D_{\text{р}}$ – коефіцієнт розбіжності у разі, коли Земля вважається сферою; $\rho=\gamma\rho_0$, де ρ_0 коефіцієнт відбиття від гладкої поверхні, а γ коефіцієнт шорсткості поверхні, який менше 1.

В (1) $\theta=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r$ це набіг фази за рахунок різниці ходу Δr між прямими і відбитими променями. Відповідно до [10, 12] різниця ходу Δr визначається як:

$$\Delta r=\frac{2Hh}{R}\left(1-\frac{r_1^2}{2a_{ef}H}\right)\left(1-\frac{r_2^2}{2a_{ef}H}\right), \quad (2)$$

де r_1, r_2 відстані від точки випромінювання та прийому до точки відбиття відповідно; H, h висота антени РЛС та висота цілі відповідно; a_{ef} – ефективний радіус Землі; R – поточна дальність до цілі.

Другий варіант розрахунку Δr наведено в [13]:

$$\Delta r=\frac{2Hh}{R}\left[1-\frac{1}{2a_{ef}H}\left(\frac{Rh}{h+H}\right)^2\right]\left[1-\frac{1}{2a_{ef}H}\left(\frac{RH}{h+H}\right)^2\right]. \quad (3)$$

Цей вираз дозволяє безпосередньо обчислити набіг фази, проте він досить громіздкий. Простіший вираз для Δr наведено в [11]:

$$\Delta r=\frac{2Hh}{R}\left[1-\left(\frac{R}{R_{\text{г}}}\right)^2\right]^2. \quad (4)$$

На рис. 5 (a, b, c) графічно представлений процес відбиття радіохвиль від плоскої та сферичної земної поверхні.

Рис. 5, a) відповідає випадку, коли відбиття відбувається від плоскої поверхні, причому для малих кутів місця коефіцієнт відбиття від плоскої Землі $\rho=-1$. Рис. 5, b) відповідає випадку, коли відбиття відбувається від сферичної земної поверхні, причому для малих кутів місця $\rho=-1$, а коефіцієнт розбіжності $D_p<1$. На рис. 5, c) представлений процес відображення радіохвиль, коли Земля представлена сферою, і дано приведені висоти $h'_{\text{а}}$ і $h'_{\text{ц}}$ [11].

Коефіцієнт розбіжності $D_p<1$ характеризує коефіцієнт відбиття від сферичної поверхні, коли відбита енергія від цілі або антени не повністю спрямовується в бік приймальної антени або цілі. Це відбувається через те, що на кривій поверхні відбуваються перевідбиття в різних напрямках, і відбитий пучок енергії розходиться кутом (рис. 5, b). Величина коефіцієнта D_p залежить від дальності. При дальності до цілі, порівнянної з дальністю радіогоризонту $D_p\approx 0{,}3...0{,}4$. При наближенні до РЛС величина коефіцієнта $D_p\approx 0{,}9...0{,}95$ [12].

Використовуючи множник ослаблення, можна записати вираз для дальності виявлення НЛЦ, у вигляді:

$$R_{\text{нлц}}^4=\frac{2P\tau\cdot G_0^2\left|F\right|^4\sigma\cdot\lambda_0^2\cdot\left|F\left(\varepsilon\right)\right|^4}{\left(4\pi\right)^3\alpha KT_0L}, \quad (5)$$

де L – втрати; α – коефіцієнт помітності; P імпульсна потужність; τ – тривалість зондуючого імпульсу; G_0 – коефіцієнт підсилення антени; α – ЕПР цілі; λ_0 – довжина хвилі; K – постійна; T_0 – температура за Кельвіном; F – інтерференційний множник; $F\left(\varepsilon\right)$ – діаграма спрямованості у вертикальній площині, $F\left(0\right)=1$; ε – кут місця.

За відсутності багатопроменевих відбиттів, тобто при F = 1, $F\left(\varepsilon\right)=F\left(0\right)=1$, дальність

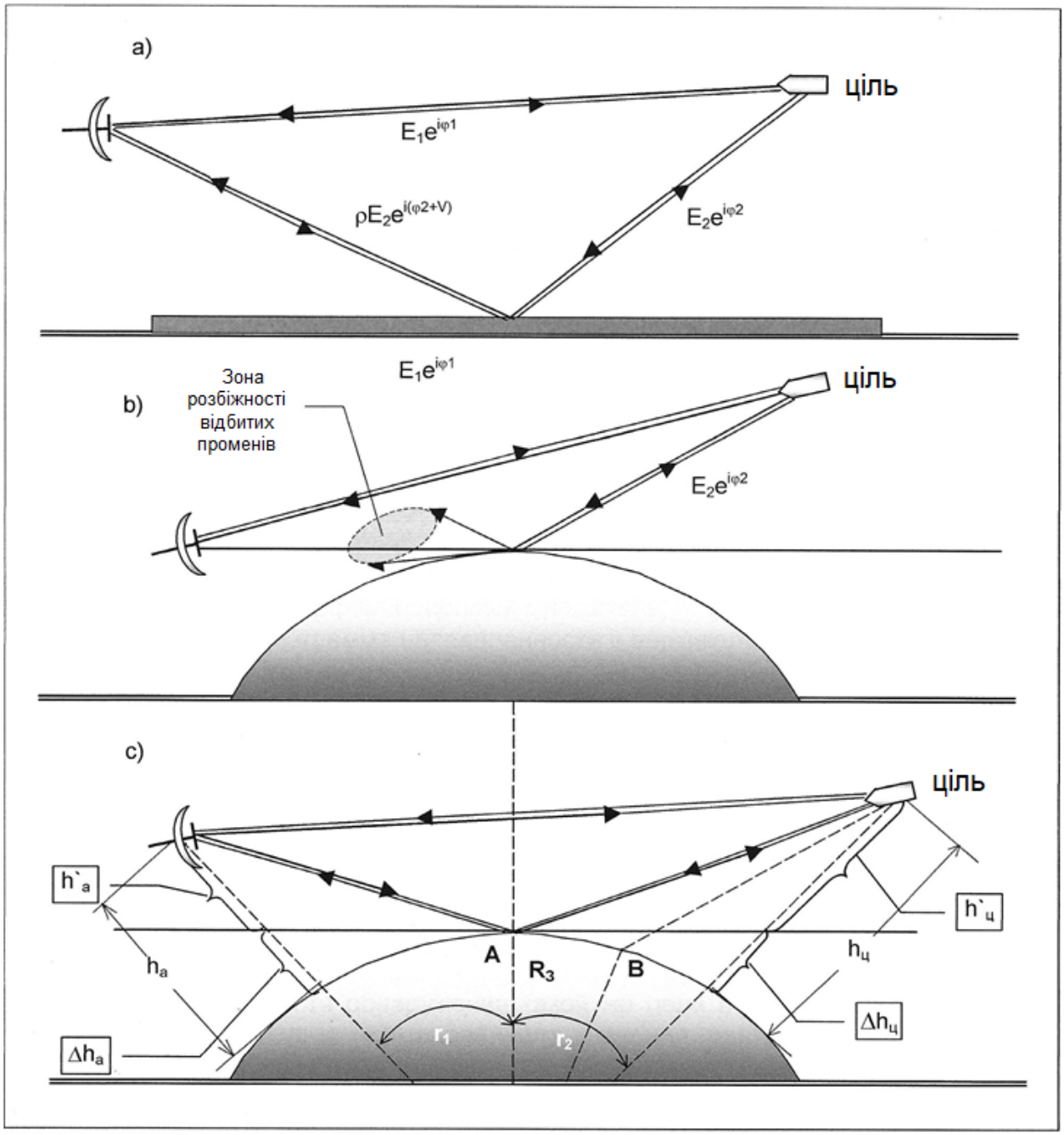


Рис. 5. Процес відбиття радіохвиль від плоскої та сферичної земної поверхні

виявлення у вільному просторі розраховується за такою формулою:

$$R_{\text{нлц}}^4 = \frac{2P\tau \cdot G_0^2 \sigma \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^3 \alpha K T_0 L}. \qquad (6)$$

Тоді вираз (5) з урахуванням (6) можна привести до вигляду:

$$R_{\text{нлц}} = R_0 \cdot |F| \cdot |F(\varepsilon)|. \qquad (7)$$

Таким чином, дальність виявлення НЛЦ визначається добутком дальності виявлення такої ж цілі у вільному просторі, множника ослаблення і нормованого значення діаграми спрямованості антени у вертикальній площині.

При строгому підході, розраховуючи дальність виявлення НЛЦ, необхідно враховувати дифракційні явища. Однак, якщо виявляємо ціль з малою ЕПР, близько 0,1 м^2 і менше, то і величина відбитого сигналу сама по собі мала. А якщо врахувати, що в сантиметровому діапазоні хвиль на дальності радіогоризонту спостерігається різке загасання поля на 12...15 дБ в один бік, а при двосторонньому поширенні радіохвиль у разі активної

РЛС згасання, в середньому, складе ~ 30 дБ, то складова поля відбитого від цілі сигналу за рахунок дифракції має достатньо малу величину.

Розрахунки показують, що врахування дифракційної складової при виявленні малорозмірної НЛЦ, забезпечує збільшення дальності в середньому на 1...1,5 км. Таким чином, оцінку дальності НЛЦ із необхідною для практики точністю можна забезпечити навіть у рамках інтерференційної зони РЛС.

З виразу (1) видно, що визначення множника ослаблення необхідно насамперед знати різницю ходу Δr між прямими і відбитими променями. Вирази (2), (3) і (4) дозволяють приблизно оцінити Δr, а більш точний розрахунок можна зробити, використовуючи поняття «приведених» висот [2].

Ввівши це поняття, для антени $h'_а$ та цілі $h'_ц$ (рис. 5, с), розглянемо суть методики розрахунку множника ослаблення з урахуванням того, що Земля – сфера. Через точку відображення проводиться пряма, перпендикулярна до радіусу Землі $R_З$. Перетин цієї прямої з лініями висоти антени та цілі розділить кожну з них на частини $\Delta h_а$ та $h'_а$, а також $\Delta h_ц$ та $h'_ц$. Величини $h'_а$ і $h'_ц$ є як би висотами антени і цілі над плоскою Землею, причому у процесі руху цілі вони змінюються, тому що точки відбивань також змінюються.

Розрахункові співвідношення для наведених висот, методика розрахунку як графіків і таблиць представлені, наприклад, в [2, 3].

Наведемо окремі математичні співвідношення:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r\,; \qquad \Delta r = \frac{2h'_а h'_ц}{R}, \tag{8}$$

де R поточна дальність; $h'_а$ і $h'_ц$ приведені висоти; Δr різницю ходу між прямим і відбитим променем;

$$h'_а = h_а\left(1 - \frac{\Delta h_а}{h_а}\right) \quad ; \qquad h'_ц = h_ц\left(1 - \frac{\Delta h_ц}{h_ц}\right) \quad .$$

Наведені вище співвідношення справедливі з точністю порядку 1% кутів місця менше 8°, тобто повністю придатні для розрахунків дальності виявлення НЛЦ. При кутах місця до 24° похибка не перевищить 10% [2].

Скориставшись для знаходження різниці ходу Δr у формулі (1) виразами (3) і (4), розрахунки можна значно спростити. На рис. 6 та 7 наведено графіки множника ослаблення при значеннях параметрів $\lambda = 3$ см, $h_а = 15$ м.

На рис. 6 наведено графік множника ослаблення для висоти цілі $h_ц$ = 5 м, рис. 7 графік множника ослаблення для висоти цілі $h_ц$ = 10 м.

Крива 1 – графік множника ослаблення, розрахований за спрощеними виразами (3) та (4). Крива 2 множник ослаблення, обчислений за методикою з використанням приведених висот. Видно, що різницю між ними спостерігається лише області «хвостів».

На рис. 6 і 7 також проведено графічне визначення дальності виявлення низької цілі

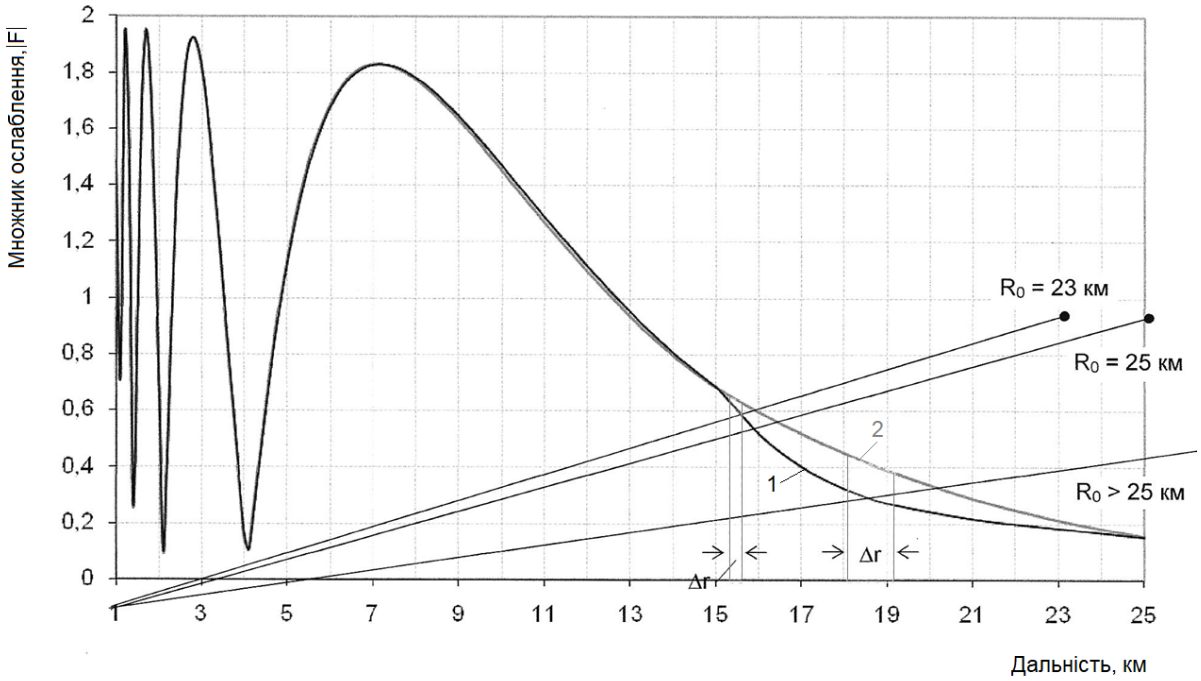


Рис. 6. Залежність множника ослаблення від дальності для висоти цілі 5 м

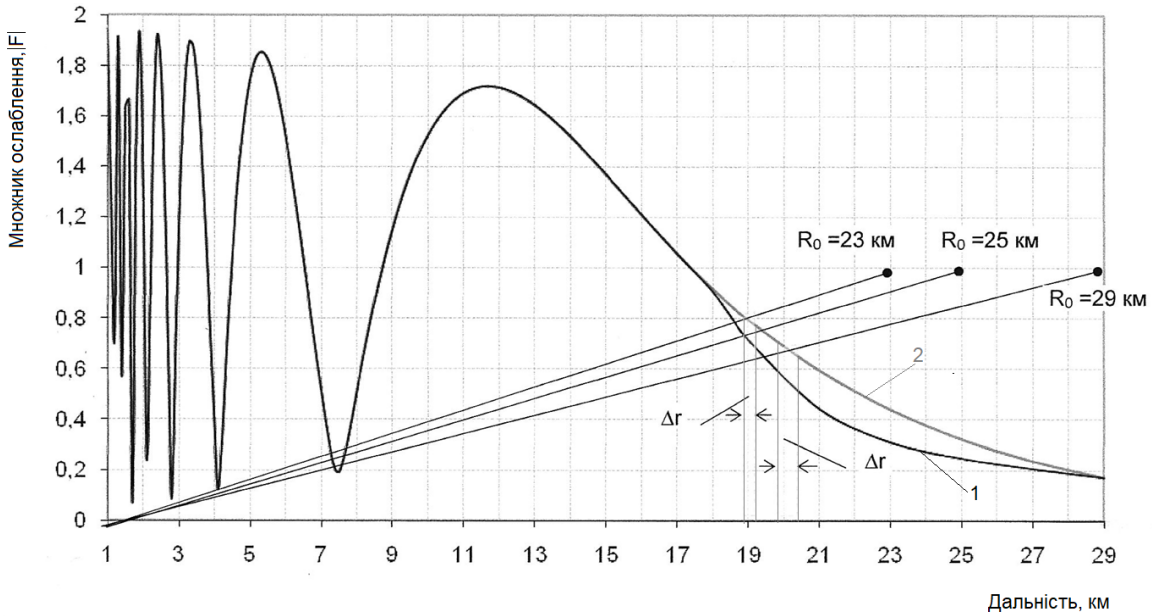


Рис. 7. Залежність множника ослаблення від дальності для висоти цілі 10 м

за виразом (7) для різних значень дальності виявлення у вільному просторі. Похибки визначення дальності виявлення НЛЦ лежать у межах 1...2 км, причому за спрощеними виразами оцінка дальності виходить меншою, а значить, їх застосування цілком допустимо.

Крім наведених методів оцінки дальності НЛЦ, часто використовується поширений у відомих джерелах [2, 6–8] вираз для дальності виявлення НЛЦ, який отримано для плоскої Землі, і в якому інтерференційний множник розраховується за формулою $F = \sin(\theta/2)$:

$$R_{\text{нлц}} = \sqrt[8]{\frac{P \cdot G_0^2 \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пр.min}}}} \cdot \sqrt{\frac{4\pi h_{\text{а}} H}{\lambda}}. \qquad (9)$$

Як зазначено вище, плоскою Землю можна вважати лише на дальностях, які не перевищують половину дальності радіогоризонту, тобто при $R \le D_{\text{г}}/2$. Тому визначення потенційних можливостей РЛС використовувати у розрахунках вираз (9) не коректно. На підтвердження цього на рис. 8 наведено графіки множників ослаблення (інтерференційні множники) для висоти цілі 10 м та висоти установки антени 15 м. Графіки значно розходяться області «хвостів», так як для плоскої Землі (крива білого кольору) ослаблення проходить дуже повільно, і величина множника ослаблення не зменшується навіть поза радіогоризонту. У той самий час відомо [1], що за використання моделі сферичної Землі напруженість поля різко слабшає (~ 15...20 дБ однією бік).

Відома також спрощена формула для розрахунку дальності НЛЦ з урахуванням сферичності Землі:

$$R_{\text{нлц}} = D_{\text{г}}\left[1 - \frac{D_{\text{г}}}{2A}\left(1 - \frac{D_{\text{г}}}{2A}\right)\right], \qquad (10)$$

де $A = \sqrt{\frac{4\pi \cdot h_{\text{ц}} h_{\text{а}} R_0}{\lambda}}$; λ довжина хвилі; R_0 дальність виявлення цілі у вільному просторі; $D_{\text{г}}$ – дальність радіогоризонту.

У рис. 9 наведені зони виявлення НЛЦ у нижньому промені діаграми спрямованості антени, розраховані за точними формулами з урахуванням того, що Земля є сферою. Розрахунки проведені для набору гіпотетичних РЛС таким чином, щоб отримані графіки можна було використовувати при оцінці дальності цілей для широкого кола розроблюваних РЛС.

Графіки розраховані для середини діапазонів радіохвиль λ_0 = 3,5 см і λ_0 = 10 см для діаграми спрямованості з шириною основної пелюстки у вертикальній площині $F(\varepsilon)$ 3° та 2° з рівнем 0,707 (за напругою). Рівні бічних пелюсток не перевищують 26 дБ. Ці результати справедливі для відхилення від середніх значень λ_0 на $\pm\Delta\lambda/\lambda_0 = 0{,}05$.

При користуванні графіками основними параметрами є:

– дальність D_0 виявлення у вільному просторі цілі з ЕПР $\sigma_{\text{ц}}$;

– висота встановлення антени.

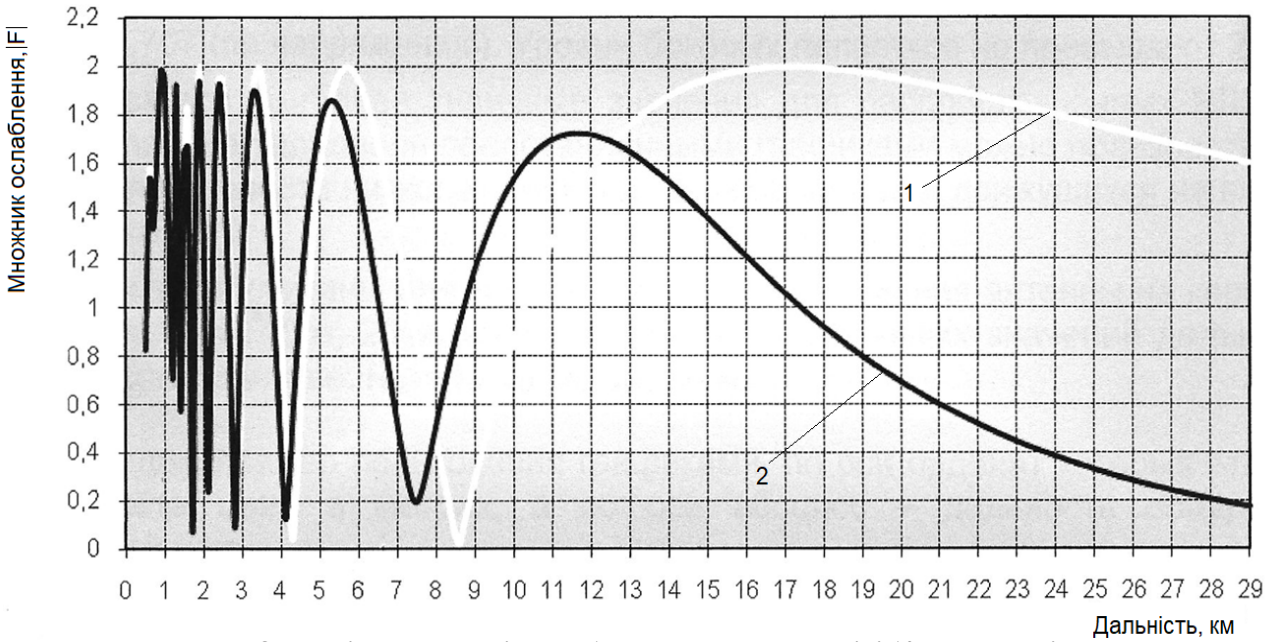


Рис. 8. Графіки множників ослаблення F для висоти цілі 10 м за моделі:
1 – Земля плоска; 2 – Земля сферична

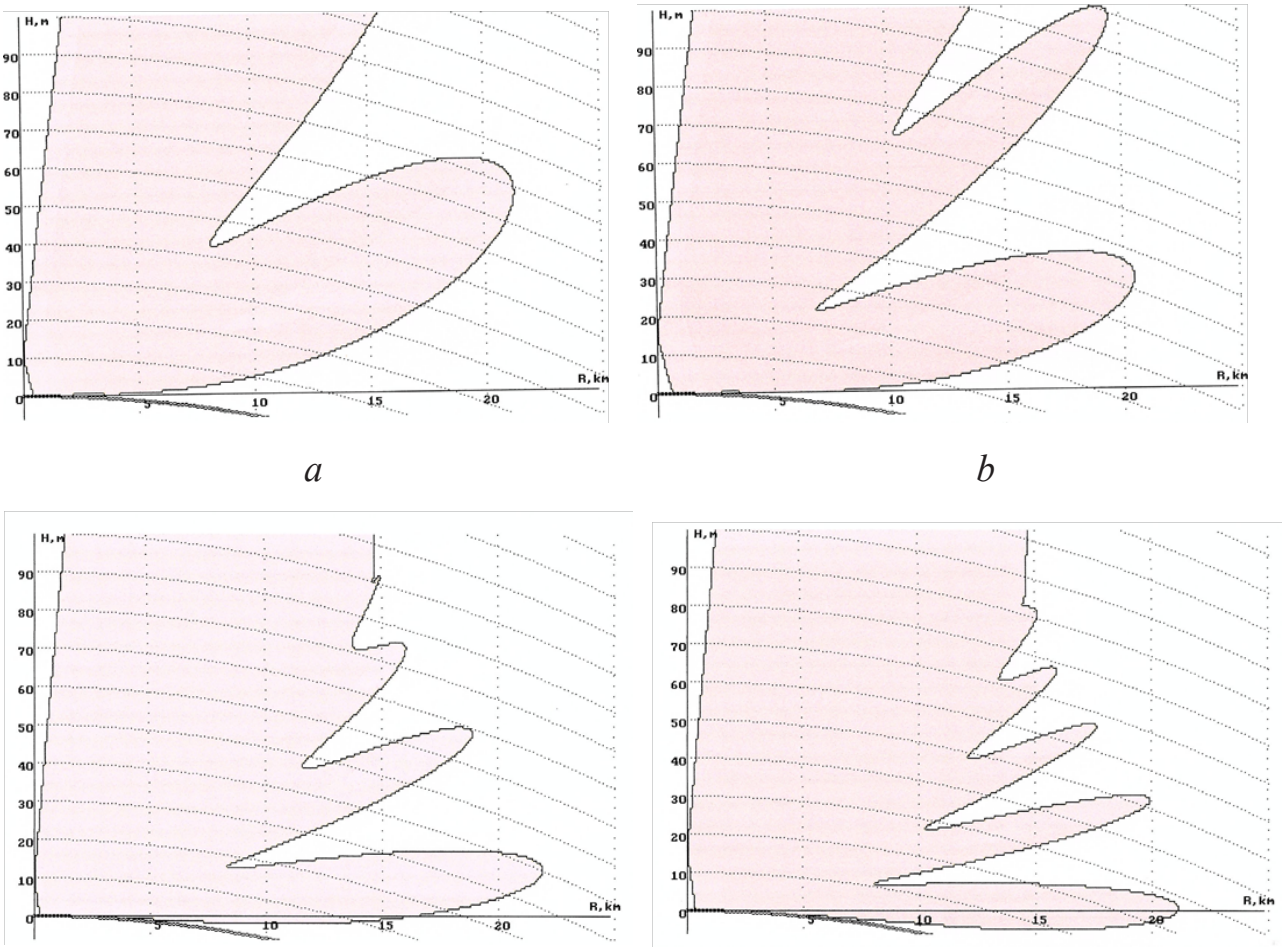


Рис. 9. Зони виявлення НЛЦ

Рис. 9. Зони виявлення НЛЦ: D_0 = 15 км, довжина хвилі λ_0 = 10 см, ширина променю $F(\varepsilon)$ = 2°, кут установки променю 0,8°, висота антени h_a = 10 м (а) та h_a = 15 м (*b*); D_0 = 15 км, довжина хвилі λ_0 = 3,5 см, ширина променю $F(\varepsilon)$ = 3°, кут установки променю 0,8°, висота антени h_a = 10 м (*c*) та h_a = 15 м (*d*).

Так як це найбільш типові значення для поширених РЛС, то в даному діапазоні радіохвиль представленими графіками можна користуватися для визначення дальності НЛЦ, особливо для рухомих на висотах, менших 50 м.

Висновки. Графіки розраховані для типових висот розташування антени на висоті зокрема, h_a = 10 м, 15 м, 20 м, 25 м, а також кількох значень дальності у вільному просторі: D_0 = 15 км, 20 км, 30 км, по осі ординат яких відкладена висота польоту цілі в метрах, а по осі абсцис дальність виявлення НЛЦ.

Для користування графіками необхідно:

1. Здійснити розрахунок дальності виявлення у вільному просторі для заданої оцінки, відповідної ЕПР НЛЦ.

2. Підібрати графік з близькими до розрахункових значеннями дальності виявлення і передбачуваними висотами установки антени. Далі, опустивши з цієї точки перпендикуляр на вісь абсцис, отримаємо дальність.

Запропоновані графіки не охоплюють усі можливі варіанти РЛС та всі діапазони хвиль, але за потреби, використовуючи формули отримані в роботі, можна розрахувати зони виявлення та дальності виявлення НЛЦ.

Список літератури:

1. Васюта К. С., Тесленко О. В., Купрій В. М., Малишев О. А. Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору. Київ : Скіф, 2023. 212 с.

2. Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник / за ред. Ю. Л. Мороза, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. Київ : Вища школа, 1999. 838 с.

3. Обод І., Свид І., Мальцев О. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору : навчальний посібник. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.

4. Obod I., Svyd I., Maltsev O., Vorgul O., Maistrenko G. and Zavolodko G., Optimization of the Quality of Information Support for Consumers of Cooperative Surveillance Systems. Data-Centric Business and Applications, 2020. P. 133–155.

5. Альошин Г. В. Ефективність інформаційно-вимірювальних радіотехнічних систем. Харків, ХУ ПС, 2005. 294 с.

6. Малайчук В. П., Рожковський В. Ф., Клименко С. В. Теоретичні основи радіолокації. Дніпро : ДНУ, 2017. 212 с.

7. Бондаренко Б. Ф., Вишнівський В. В., Долгушин В. П. та ін. Теорія радіолокаційних систем / За заг. ред. С. В. Лєнкова. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. 383 с.

8. Сухаревський О. І., Василець В. О., Нечитайло С. В. Довідник характеристик розсіювання повітряних та наземних радіолокаційних об'єктів. Харків : ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2019. 304 с.

9. Riabukha V. P. Radar Surveillance of unmanned aerial vehicles (review). Radioelectronics and Communications Systems. 2020. No. 63 (11). P. 561–573.

10. Patel J. S., Fioranelli F, Anderson D. Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones. IET Radar, Sonar and Navigation. 2018. Vol. 12. No. 9. P. 911–919.

11. Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Scattering Characteristics of Aerial and Ground Radar Objects. Boca Raton : CRC Press, 2024. 530 p.

12. Lü M., Yi J., Wan X., Liu Y. Experimental research of drone monitoring using multi-static passive radar. The Journal of Engineering. 2019. Vol. 2019. No. 20. P. 6795–6798.

13. Shi X., Yang C., Xie W., Liang C., Shi Z., Chen J. Anti-Drone System with Multiple Surveillance Technologies: Architecture, Implementation, and Challenges. IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. No. 4. P. 68–74.

14. Zalevsky G. S., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Integral equation modelling of unmanned aerial vehicle radar scattering characteristics in VHF to S frequency bands. IET Microwaves, Antennas and Propagation. 2021. Vol. 15. No. 10. P. 1299–1309.

Tachynina O.M., Slobodian O.P., Yenchev S.V., Tachynin Ye.V. DETERMINING THE DETECTION RANGE OF LOW-FLYING TARGETS BY A SURVEILLANCE RADAR STATION

The detection and tracking of low-altitude aerial targets is carried out using a surveillance radar system. This process entails a range of scientific, technical, and engineering challenges that must be addressed at both the design and operational stages of the radar system lifecycle. The effectiveness of target detection is influenced by a number of factors, including physical phenomena associated with radio wave propagation over the Earth's surface, the technical and tactical characteristics of low-flying targets, and the engineering implementation of detection methods and devices, all of which have a significant impact on radar performance.

This study focuses on a current scientific problem: the determination of the detection range for low-flying targets, taking into account relevant physical effects and the tactical-technical characteristics of the targets. The paper examines the impact of several key physical phenomena, including the limitation of maximum detection range due to the radar horizon caused by linear radio wave propagation; interference effects; signal masking resulting from strong reflections of the probing signal from the underlying surface; and signal masking by clutter caused by atmospheric inhomogeneities at the boundary between the surface and the atmosphere.

The causes and trajectories of "angel echoes" are analyzed in the range–azimuth coordinate system. The paper establishes analytical dependencies of the detection range on antenna installation height, target altitude, radar cross-section, radio signal wavelength, transmitted pulse power, antenna radiation pattern, and ambient air temperature, considering both flat and spherical Earth models. Additionally, the study derives attenuation factor dependencies on target range and altitude for both Earth models. Detection zones for low-flying targets within the lower beam of the antenna radiation pattern are constructed using the spherical Earth model for various antenna heights, signal wavelengths, radar horizon ranges, beam widths, and elevation angles.

The proposed analytical expressions enable accurate calculation of detection zones and ranges for low-flying targets under realistic operating conditions.

Key words: *surveillance radar, low-flying target, detection range, detection zone, radar cross-section.*

УДК 004.722.23
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/14

Тимофеєв Є.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MIMO ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті розглянуто підходи до застосування технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) у безпроводових сенсорних мережах (БСМ) з метою підвищення ефективності моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. Технологія MIMO демонструє високий потенціал у забезпеченні стабільного та надійного зв'язку, розширенні зони покриття, підвищенні пропускної здатності й енергоефективності безпроводових систем, що робить її перспективною для використання в умовах складного середовища функціонування об'єктів критичної інфраструктури (КІ). У статті здійснено систематизацію принципів роботи, конфігурацій та типів реалізації технології MIMO (у тому числі Massive MIMO, Cooperative MIMO та Virtual MIMO), а також охарактеризовано архітектуру й особливості функціонування БСМ.

В останні роки спостерігається стрімке впровадження безпроводових сенсорних мереж у різних сферах господарства та інфраструктури для моніторингу об'єктів, розташованих на великих географічних площах. Завдяки розвитку БСМ сформувався новий підхід до побудови «розумних» систем спостереження, що дозволяють у реальному часі отримувати, передавати та аналізувати інформацію про стан навколишнього середовища, інженерних конструкцій та технічних систем. Особливої актуальності ці технології набувають у контексті забезпечення стабільності та безпеки критичної інфраструктури, до якої належать енергетичні комплекси, транспортні системи, об'єкти водопостачання, телекомунікації та інші життєво важливі елементи державного та економічного значення.

Однак традиційні методи моніторингу таких об'єктів часто є затратними, складними в масштабуванні та не здатні забезпечити безперервний контроль у режимі реального часу. Безпроводові сенсорні мережі пропонують гнучке, масштабоване та економічно ефективне рішення. Проте їх ефективне функціонування в умовах підвищених вимог до надійності, пропускної здатності, енергоспоживання та безпеки даних залишається серйозним викликом. У цьому контексті технологія MIMO, яка дозволяє паралельну передачу множинних потоків даних через кілька антен одночасно, забезпечуючи високі характеристики каналу зв'язку без збільшення потужності передавача або ширини смуги частот, стає ключовим технологічним рішенням.

Ключові слова: *MIMO, безпроводові сенсорні мережі, критична інфраструктура, моніторинг, енергоефективність, безпека передачі даних.*

Постановка проблеми. Забезпечення безперервного моніторингу критичних об'єктів, зокрема транспортних, енергетичних і промислових, потребує використання гнучких, масштабованих та енергоефективних рішень, здатних працювати в складних радіочастотних умовах. Традиційні методи не завжди відповідають цим вимогам, що зумовлює потребу в застосуванні інноваційних технологій, таких як MIMO.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікаціях провідних наукових установ (MITRE, MDPI, Intel, Silvus Technologies) наведено результати досліджень щодо ефективності MIMO в умовах багатопроменевого поширення, зниження енергоспоживання за рахунок Cooperative/Virtual MIMO. Окремі дослідження присвячені прикладним аспектам використання MIMO для моніторингу мостів, трубопроводів і енергетичних об'єктів.

Постановка завдання. Метою статті є формулювання аналітичного бачення доцільності використання технології MIMO в БСМ для

моніторингу КІ, виявлення її основних переваг, проблем та перспектив розвитку.

У статті проаналізовано:

– теоретичні засади функціонування MIMO і його переваги для БСМ;

– приклади практичного впровадження в системах моніторингу мостів, трубопроводів та енергетичних об'єктів;

– виклики, пов'язані з апаратними та енергетичними обмеженнями сенсорних вузлів;

– тенденції розвитку, пов'язані з інтеграцією MIMO.

Виклад основного матеріалу. Технологія Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) являє собою безпроводову технологію, яка використовує множинні передавачі та приймачі для одночасної передачі більшого обсягу даних [5]. Завдяки використанню кількох антен на обох кінцях безпроводового каналу зв'язку, технологія MIMO здатна значно підвищити продуктивність та надійність передачі даних.

Основні принципи роботи технології MIMO базуються на використанні явища багатопроменевого поширення радіохвиль (multipath). У традиційних безпроводових системах багатопроменеве поширення часто призводить до інтерференції та сповільнення передачі сигналу. Однак, технологія MIMO використовує цей природний феномен на свою користь. Замість того, щоб вважати відбиті та розсіяні сигнали перешкодами, технологія MIMO застосовує спеціальні алгоритми для їх об'єднання, що дозволяє підвищити потужність прийнятого сигналу та розширити зону покриття.

Одним з ключових принципів технології MIMO є розділення сигналу на кілька незалежних потоків даних, що передаються одночасно через різні антени (spatial multiplexing). Іншим важливим принципом є передача одного і того ж сигналу різними шляхами (diversity coding). Це забезпечує підвищену надійність зв'язку, оскільки ймовірність одночасного погіршення всіх шляхів передачі є низькою. Завдяки цьому зменшується вплив згасання сигналу (fading) та підвищується стійкість до перешкод.

Існує кілька основних конфігурацій технології MIMO (рис. 1). Традиційна система з одним передавачем та одним приймачем називається SISO (Single-Input Single-Output). Системи з одним передавачем та кількома приймачами називаються SIMO (Single-Input Multiple-Output), а системи з кількома передавачами та одним приймачем – MISO (Multiple-Input Single-Output). Повноцінна MIMO система включає кілька передавачів та кілька приймачів [2].

Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) визначається як мережа просторово-розподілених датчиків, які здійснюють моніторинг та запис фізичних умов навколишнього середовища та передають зібрані дані до датацентру. Ці мережі здатні вимірювати різноманітні параметри, такі як температура, вологість, тиск, освітленість, рівень забруднення, звук, рух тощо.

Основні характеристики БСМ включають їхню структуру (рис. 2), яка зазвичай складається з вузлів (сенсорних та виконавчих), маршрутизаторів та шлюзу [8]. Сенсорні вузли є малопотужними пристроями з обмеженими обчислювальними ресурсами, пам'яттю та енергопостачанням. Для передачі даних вони використовують безпроводовий зв'язок, найчастіше

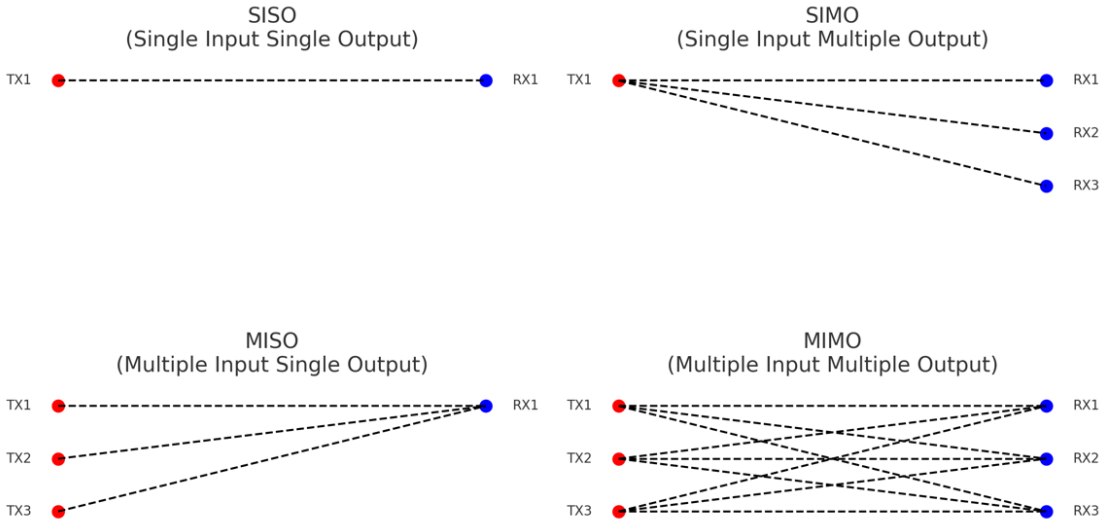


Рис. 1. Конфігурації безпроводового зв'язку

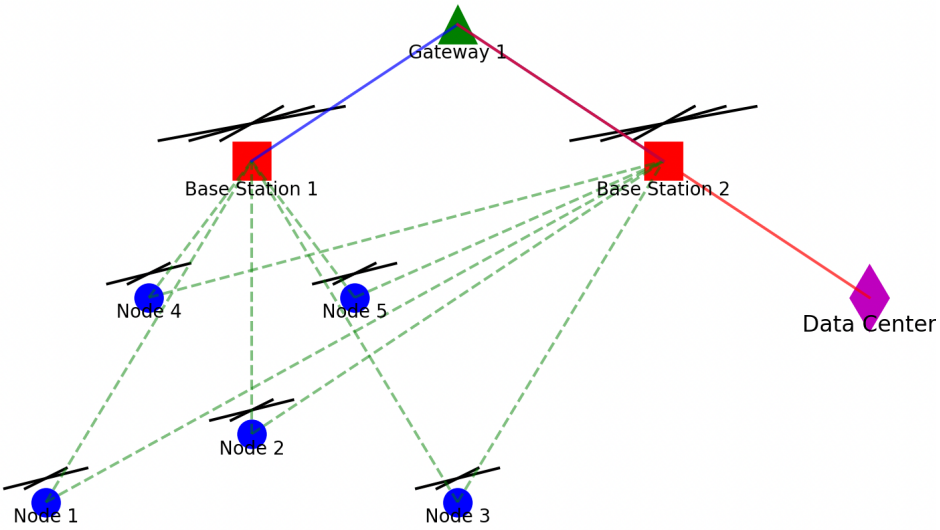


Рис. 2. Структурна схема системи мобільної сенсорної мережі із MIMO

радіочастотний [7]. Залежно від конкретного застосування, БСМ можуть мати різну топологію, включаючи зіркову, сітчасту, деревоподібну та шинну. Кожна БСМ розробляється та розгортається для виконання конкретних завдань моніторингу. Типова архітектура БСМ включає сенсорні вузли, які є основою мережі та складаються з датчиків, процесора, трансивера та джерела живлення. Маршрутизатори використовуються для розширення діапазону зв'язку або обходу перешкод [8]. Шлюз забезпечує зв'язок БСМ з іншими мережами, такими як Інтернет, дозволяючи передавати дані до віддаленої базової станції для подальшої обробки, аналізу та зберігання.

Застосування БСМ є надзвичайно широким і охоплює різні галузі. У моніторингу навколишнього середовища БСМ використовуються для контролю якості повітря, виявлення лісових пожеж та моніторингу водних ресурсів. В охороні здоров'я вони застосовуються для моніторингу стану пацієнтів та у фітнес-трекерах. У сільському господарстві БСМ допомагають контролювати умови вирощування та керувати поливом. У промисловості вони використовуються для моніторингу технологічних процесів та контролю обладнання. У транспортній галузі БСМ застосовуються для моніторингу стану мостів та дорожнього руху. В енергетиці БСМ використовуються для моніторингу трубопроводів та електростанцій. У сфері безпеки та спостереження БСМ використовуються для виявлення вторгнень та моніторингу територій [1].

БСМ характеризуються обмеженими ресурсами та орієнтованим на конкретне застосування дизайном. Їхня здатність автономно працювати в різноманітних середовищах робить їх придатними для моніторингу критичної інфраструктури, але їхні обмеження потребують вирішення за допомогою таких технологій, як MIMO.

Критична інфраструктура охоплює об'єкти, які є невід'ємною частиною функціонування суспільства та економіки [1]. Це включає в себе транспортні мережі, енергетичні системи, комунікаційні засоби, системи водопостачання та інші життєво важливі об'єкти. Моніторинг такої інфраструктури вимагає високого рівня надійності, доступності та безпеки передачі даних [1]. Безперервний контроль є необхідним для своєчасного виявлення потенційних відмов, пошкоджень або зовнішніх загроз, таких як кібератаки або фізичні втручання [1].

Безпроводові сенсорні мережі можуть забезпечити масштабоване та економічно ефективне рішення для моніторингу географічно розподіленої критичної інфраструктури [1]. Їхня гнучкість у розгортанні та низька вартість окремих сенсорних вузлів роблять їх привабливою альтернативою традиційним дротовим системам моніторингу. Однак, безпроводові канали зв'язку є більш вразливими до різних видів перешкод, шуму та атак порівняно з дротовими мережами [1].

Забезпечення безпеки даних, включаючи їхню конфіденційність, цілісність та доступність, є критично важливим аспектом моніторингу КІ за допомогою безпроводових технологій [1]. Несанкціонований доступ до даних моніторингу може розкрити вразливості інфраструктури, що може бути використано для завдання шкоди або

порушення її функціонування [9]. Крім того, енергоефективність є ключовим фактором для тривалої та безперебійної роботи БСМ, особливо у важкодоступних місцях, де заміна або підзарядка батарей сенсорних вузлів може бути складною або неможливою [4].

Різні типи критичної інфраструктури, такі як мости, трубопроводи та енергетичні об'єкти, мають свої специфічні вимоги до моніторингу. Наприклад, моніторинг мостів може включати вимірювання вібрації та деформації, тоді як моніторинг трубопроводів може вимагати контролю тиску та виявлення витоків. Технологія MIMO пропонує потенційні рішення для покращення характеристик БСМ при моніторингу КІ, зокрема підвищення надійності зв'язку, розширення зони покриття та оптимізацію енергоспоживання.

Однією з головних переваг використання технології MIMO в безпроводових сенсорних мережах для моніторингу критичної інфраструктури є значне підвищення пропускної здатності мережі. Крім того, технологія MIMO значно покращує надійність зв'язку завдяки використанню технік просторового рознесення (spatial diversity). Передача одного і того ж сигналу різними незалежними шляхами зменшує ймовірність одночасного глибокого згасання сигналу на всіх шляхах, що підвищує стійкість до перешкод та згасань. У складних радіочастотних середовищах з великою кількістю відбивань та розсіювань сигналу, характерних для промислових об'єктів або міської забудови, технологія MIMO може забезпечити значно стабільніший та надійніший зв'язок порівняно з традиційними системами з однією антеною (SISO).

Підвищена надійність передачі даних є критично важливою для моніторингу критичної інфраструктури, де втрата інформації про стан об'єктів може мати серйозні наслідки для безпеки та функціонування важливих систем. Забезпечення своєчасної та безперебійної доставки даних від сенсорів, розташованих на об'єктах КІ, до центрального пункту моніторингу є ключовим для прийняття обґрунтованих рішень та запобігання аварійним ситуаціям. Теоретично, пропускна здатність безпроводового каналу при використанні технології MIMO визначається за допомогою детермінанти матриці каналу H і пропорційна кількості антен (n_t, n_r), що дозволяє значно збільшити швидкість передачі даних без розширення смуги частот:

$$C = log_2 \det\left(\mathrm{I}_{n_r} + \frac{\rho}{n_t} \mathrm{H}\mathrm{H}^* \right) [\text{біт/с/Гц}]$$

де H – матриця каналу розміром $n_r \times n_t$,

ρ – середнє відношення сигнал/шум (SNR),

I_{n_r} – одинична матриця розміром n_r ,

H^* – ермітове (спряжене транспоноване) перетворення матриці H .

Для підвищення надійності, техніки просторового рознесення забезпечують зниження ймовірності помилки пропорційно ступеню рознесення d , що критично важливо у складних радіочастотних середовищах із багатопроменевим поширенням:

$$P_e \approx \left(\frac{1}{\mathrm{SNR}} \right)^d$$

де P_e – ймовірність помилки,

P_e – ступінь рознесення (кількість незалежних шляхів).

Таким чином, технологія MIMO значно підвищує стабільність зв'язку та стійкість до перешкод навіть у складних умовах міської забудови або промислових об'єктів. Технологія MIMO також сприяє розширенню зони покриття безпроводових сенсорних мереж та покращенню якості прийнятого сигналу. Завдяки використанню багатопроменевого формування (beamforming), технологія MIMO може направляти сигнал у вузькому промені в бік приймача, що дозволяє збільшити дальність зв'язку та підвищити рівень сигналу на приймальній стороні. Це особливо корисно для моніторингу великих за площею об'єктів критичної інфраструктури, таких як довгі трубопроводи або розгалужені енергетичні мережі.

Крім того, технологія MIMO ефективніше використовує явище багатопроменевого поширення радіохвиль. Замість того, щоб відбиті та розсіяні сигнали створювали перешкоди, технологія MIMO здатна їх комбінувати для покращення якості прийнятого сигналу навіть за відсутності прямої видимості між передавачем та приймачем. Це особливо важливо в умовах міської забудови або на промислових об'єктах, де можуть бути різноманітні перешкоди для прямого поширення радіохвиль. Розширення зони покриття, забезпечене технологією MIMO, може призвести до зменшення кількості необхідних сенсорних вузлів для моніторингу великих об'єктів критичної інфраструктури. Це, в свою чергу, може знизити загальну вартість розгортання та експлуатації мережі, а також спростити її архітектуру та управління. Покращена якість сигналу

також сприяє підвищенню надійності передачі даних та зменшенню кількості помилок. Теоретично, використання просторового формування променя дозволяє досягти виграшу пропорційного кількості антен N:

$$G_{\text{beamforming}} = N \text{ або } G_{\text{dB}} = 10\log_{10}(N)$$

що безпосередньо призводить до підвищення відношення сигнал/шум (SNR) на приймальній стороні:

$$\text{SNR}_{\text{beamforming}} = \text{SNR}_{\text{omnidirectional}} + G_{\text{dB}}$$

Також перспективним напрямом є застосування концепції масивного MIMO (Massive MIMO), яка дозволяє суттєво збільшити зону покриття та якість обслуговування завдяки використанню великої кількості антен на передавальній стороні.

Питання енергоефективності є одним з ключових при розгортанні безпроводових сенсорних мереж, особливо для тривалого моніторингу критичної інфраструктури. Хоча традиційні системи MIMO можуть бути досить енергоємними через складність обробки сигналів та необхідність використання кількох радіочастотних ланцюгів, розвиток Cooperative MIMO (C-MIMO) та Virtual MIMO пропонує перспективні шляхи для досягнення енергоефективності в БСМ [14].

C-MIMO дозволяє кільком малопотужним сенсорним вузлам співпрацювати для спільної передачі даних, формуючи таким чином віртуальну багатоантенну систему. Завдяки цьому може бути досягнуто значне зменшення загального енергоспоживання, особливо при передачі даних на великі відстані, де традиційним одноантенним системам (SISO) потрібна більша потужність передавача. Віртуальна технологія MIMO також використовує ідею співпраці, де кілька одноантенних вузлів об'єднуються для досягнення переваг технології технології MIMO, таких як просторове рознесення та підвищена пропускна здатність, без необхідності встановлення кількох фізичних антен на кожному вузлі, що сприяє зниженню енергоспоживання [6].

Правильний вибір режимів передачі даних та рівнів потужності в системах MIMO може бути адаптований до поточних умов радіоканалу, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання мережі [5]. Наприклад, при хороших умовах зв'язку може бути використана менша потужність передавача або більш енергоефективні методи модуляції.

Загальне енергоспоживання вузла при передачі даних визначається добутком потужності передавача на тривалість передачі:

$$E_{\text{tx}} = P_{\text{tx}} \times t_{\text{tx}}$$

Використання технології Cooperative MIMO дозволяє зменшити енергоспоживання мережі завдяки збільшенню швидкості передачі даних та скороченню часу активної роботи передавача:

$$E_{\text{C-MIMO}} < E_{\text{SISO}}$$

Додатково, адаптивне налаштування режимів модуляції і рівнів потужності відповідно до поточних умов радіоканалу дозволяє мінімізувати енергоспоживання сенсорних вузлів без зниження якості зв'язку.

Безпроводові сенсорні мережі знаходять все більше застосування для моніторингу структурного стану мостів та інших транспортних споруд. Ці мережі можуть використовуватися для вимірювання різноманітних параметрів, таких як вібрація, деформація, навантаження та температура, які можуть свідчити про цілісність та безпеку конструкцій. Застосування технології MIMO в таких БСМ може значно підвищити надійність передачі даних від сенсорів, розташованих на різних елементах мосту, особливо в складних умовах експлуатації [10].

Наприклад, у роботі [11] представлено використання радарних систем MIMO для дистанційного моніторингу зміщення мостів з високою точністю. Ці системи використовують множинні антени для передачі та прийому радіохвиль, що дозволяє отримувати детальну інформацію про динамічну поведінку мостових конструкцій під впливом різних навантажень, таких як вітер, транспортні засоби та поїзди.

У дослідженні [12] описано застосування БСМ, що складається з 26 сенсорних вузлів, для безперервного сейсмічного моніторингу кабельного мосту в Японії. Мережа успішно зареєструвала структурні реакції на 63 землетруси протягом 45 місяців моніторингу, що свідчить про високу надійність та точність системи.

В одному з експериментів [13] була проведена інтеграція мобільної БСМ, встановленої на вантажівці, зі стаціонарною БСМ, розміщеною на мосту. Це дозволило одночасно вимірювати динамічну поведінку вантажівки та вібрації мосту, що надає цінну інформацію для оцінки взаємодії транспортних засобів та інфраструктури.

Безпроводові сенсорні мережі активно використовуються для моніторингу різноманітних параметрів трубопроводів, таких як температура, тиск, а також для виявлення витоків газу або рідини. Технологія MIMO може значно покращити дальність зв'язку та надійність передачі даних вздовж довгих трубопроводів, які часто пролягають у важкодоступних місцях або в складних умовах місцевості [4].

У ряді досліджень розглядаються переваги використання технології MIMO в багатоходових БСМ для моніторингу трубопроводів · Застосування технології MIMO в таких мережах може призвести до значного покращення продуктивності мережі, зокрема зменшення енергоспоживання, затримки передачі даних та підвищення стійкості мережі.

Наприклад, у роботі [13] описано використання магнітно-індукційних БСМ (MISE – PIPE) для виявлення та локалізації витоків у підземних трубопроводах. Технологія MIMO може бути використана для підвищення надійності зв'язку між сенсорними вузлами, розташованими під землею, та надземним центром моніторингу.

Також досліджується застосування технології віртуального MIMO для енергоефективного моніторингу трубопроводів [6]. У таких системах кілька одноантенних сенсорних вузлів співпрацюють для формування віртуальної багатоантенної системи, що дозволяє досягти переваг технології MIMO при одночасному зниженні енергоспоживання.

Системи віддаленого моніторингу трубопроводів з використанням БСМ можуть контролювати широкий спектр параметрів, включаючи температуру навколишнього середовища, відносну вологість, точку роси, концентрацію чадного газу, витоки зрідженого нафтового газу, рух людей поблизу трубопроводу, а також виявляти пожежі та задимлення [14]. Застосування технології MIMO в таких системах може забезпечити більш надійну та своєчасну передачу критично важливої інформації до центру управління.

Безпроводові сенсорні мережі знаходять застосування і для моніторингу стану енергетичних об'єктів, таких як електростанції, трансформаторні підстанції та інші критично важливі елементи енергетичної інфраструктури. Ці мережі можуть використовуватися для контролю температури обладнання, виявлення аномалій та несправностей, а також для оптимізації енергоспоживання.

Застосування Cooperative MIMO (C-MIMO) також досліджується для підвищення енергоефективності в БСМ, що використовуються для моніторингу, наприклад, систем виявлення лісових пожеж поблизу енергетичних об'єктів. У таких випадках C-MIMO може забезпечити більш надійний зв'язок при одночасному зниженні енергоспоживання сенсорних вузлів.

У роботі [5] пропонуються енергоефективні протоколи кластеризації та керування потужністю для віртуального MIMO в багатоходових БСМ, що застосовуються для моніторингу. Ці протоколи спрямовані на оптимізацію використання енергії сенсорних вузлів шляхом розумного вибору вузлів-кооператорів та адаптації параметрів передачі даних.

Також пропонується схема CMIMO-SM (поєднання Cooperative MIMO та Spatial Modulation) для подальшого покращення енергоефективності в БСМ, що можуть використовуватися для моніторингу енергетичних об'єктів. Цей підхід використовує переваги обох технологій для досягнення високої енергоефективності та надійності передачі даних.

Майбутнє використання технології MIMO в безпроводових сенсорних мережах для моніторингу критичної інфраструктури, ймовірно, буде тісно пов'язане з інтеграцією цієї технології з іншими перспективними розробками [3].

Одним з ключових напрямків є інтеграція технології MIMO з технологіями Інтернету речей (IoT) для створення інтелектуальних систем моніторингу. IoT передбачає підключення великої кількості різноманітних пристроїв до мережі Інтернет, що дозволяє збирати, обмінюватися та аналізувати дані в реальному часі. Поєднання технології MIMO з IoT може забезпечити надійний та високошвидкісний зв'язок для великої кількості сенсорних пристроїв, що використовуються для моніторингу КІ.

Використання штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) також має великий потенціал для оптимізації роботи технології MIMO в БСМ [4]. Алгоритми AI/ML можуть бути використані для покращення оцінки стану каналу, оптимізації керування ресурсами мережі, виявлення аномалій у зібраних даних та прогнозування стану інфраструктури.

Застосування інтелектуальних відбивних поверхонь (Intelligent Reflecting Surfaces – IRSs) є ще однією перспективною технологією, яка може бути інтегрована з технологією MIMO для покращення якості сигналу та розширення зони покриття в складних радіочастотних середовищах [15]. IRSs являють собою поверхні, що

складаються з великої кількості пасивних відбиваючих елементів, якими можна керувати для перенаправлення радіохвиль.

Інтеграція з технологіями безпроводової передачі енергії (Wireless Power Transfer – WPT) може вирішити проблему автономного живлення сенсорних вузлів у БСМ, що особливо важливо для довготривалого моніторингу критичної інфраструктури у важкодоступних місцях.

Покращені характеристики та гнучкість, які забезпечують MIMO-базовані безпроводові сенсорні мережі, відкривають перспективи для їхнього застосування в нових сферах моніторингу критичної інфраструктури [10].

Одним з важливих напрямків є розширення застосування БСМ з підтримкою технології MIMO для моніторингу старіючої інфраструктури та прогнозування її стану. Це може допомогти своєчасно виявляти потенційні проблеми та проводити необхідне технічне обслуговування, запобігаючи аваріям та продовжуючи термін служби об'єктів.

Застосування технології MIMO в БСМ також є перспективним для моніторингу розумних міст (smart cities) та іншої міської інфраструктури [4]. Це може включати моніторинг транспортних потоків, стану будівель та споруд, систем водопостачання та енергопостачання, а також екологічного стану міського середовища.

Використання MIMO-базованих БСМ може бути корисним у системах раннього попередження про стихійні лиха, такі як зсуви ґрунту та повені. Мережі сенсорів, здатні надійно передавати дані в складних умовах, можуть надати своєчасну інформацію для прийняття рішень щодо евакуації та запобігання людським жертвам.

Моніторинг екологічної інфраструктури, включаючи ліси та водні ресурси, також є сферою потенційного застосування технології MIMO в БСМ. Це може включати моніторинг якості води, стану лісових масивів, виявлення незаконної вирубки лісу та контроль за іншими екологічними параметрами.

Нарешті, застосування технології MIMO в БСМ є актуальним і в оборонній та безпековій сферах для моніторингу критично важливих об'єктів, таких як військові бази, стратегічні об'єкти енергетики та транспортної інфраструктури [1].

Висновки. Проведене дослідження показало значний потенціал використання технології MIMO в безпроводових сенсорних мережах для моніторингу критичної інфраструктури. Теоретичні основи технології MIMO, що включають просторове мультиплексування та просторове рознесення, забезпечують суттєве підвищення пропускної здатності та надійності зв'язку в БСМ. Це є ключовою перевагою для застосувань моніторингу КІ, де безперебійна та своєчасна передача даних має вирішальне значення. Аналіз переваг та проблем застосування технології MIMO в БСМ для КІ виявив, що, поряд з покращенням продуктивності та розширенням зони покриття, існують також певні обмеження, пов'язані з апаратними ресурсами сенсорних

Таблиця 1

Перспективи розвитку технологій Massive MIMO та інтеграції технології MIMO в БСМ для моніторингу критичної інфраструктури

Технологія / Напрямок	Опис	Переваги для БСМ
Massive MIMO	Використання сотень/тисяч антен на базових станціях	Збільшення пропускної здатності, висока надійність, обслуговування великої кількості сенсорів
Ultra Massive MIMO (UM-MIMO)	Ще більше антен, ніж у Massive MIMO	Подальше збільшення пропускної здатності, покращення якості обслуговування
Міліметрові хвилі (mmWave) + Massive MIMO	Використання широкої смуги частот для передачі даних	Надвисокі швидкості передачі, підтримка HD-відео і великих обсягів даних
Інтеграція з IoT	Підключення численних пристроїв до Інтернету	Реальний час моніторингу великої кількості сенсорних пристроїв
Використання AI/ML	Оптимізація роботи технології MIMO за допомогою машинного навчання	Краще керування мережею, виявлення аномалій, прогнозування стану КІ
Інтелектуальні відбивні поверхні (IRSs)	Поверхні з керованими пасивними елементами	Покращення якості сигналу, розширення зони покриття
Wireless Power Transfer (WPT)	Безпроводове живлення сенсорних вузлів	Забезпечення автономної роботи вузлів у важкодоступних місцях

вузлів, складністю обробки сигналів та енергоефективністю. Однак, розвиток Cooperative та Virtual MIMO пропонує ефективні шляхи для подолання цих проблем.

Дослідження застосування технології MIMO в БСМ для моніторингу різних видів КІ, таких як мости, трубопроводи та енергетичні об'єкти, продемонструвало практичну цінність цієї технології. Технологія MIMO забезпечує більш точні та надійні дані моніторингу, що є важливим для своєчасного виявлення потенційних проблем та запобігання аварійним ситуаціям.

Питання безпеки та енергоефективності MIMO-базованих БСМ для КІ потребують ретельного розгляду. Розробка енергоефективних протоколів безпеки та оптимізація енергоспоживання є важливими завданнями для забезпечення тривалої та надійної роботи систем моніторингу. Майбутні тенденції розвитку використання технології MIMO в БСМ для моніторингу КІ пов'язані з технологіями Massive MIMO та Ultra Massive MIMO, інтеграцією з іншими перспективними технологіями, такими як IoT, AI/ML та IRS, а також розширенням застосування в нових сферах моніторингу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у визначенні потенційних переваг впровадження технології MIMO в БСМ для підвищення ефективності моніторингу КІ. Результати дослідження можуть бути корисними для інженерів та розробників систем моніторингу.

Перспективи подальших досліджень включають розробку нових енергоефективних та безпечних протоколів для технології MIMO в БСМ, дослідження можливостей використання новітніх технологій для подальшого покращення продуктивності та безпеки, а також проведення пілотних проектів та практичних впроваджень у різних сферах моніторингу критичної інфраструктури.

Список літератури:

1. Wireless Sensor Networks for Critical Infrastructure. URL: https://surl.lu/nqwaim
2. What is Massive MIMO Technology? How Does it Impact 5G? URL: https://surl.li/gexbzh
3. An Overview of MIMO Technology. URL: https://surl.lu/uryzkm
4. Recent Advances in Wireless Sensor Network Technology. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2753
5. Adaptive Duty-Cycle Control in Wireless Sensor Networks. URL: https://surl.lt/vymlsr
6. Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/13/6/7033
7. Wireless Sensor Networks. URL: https://multitech.com/iot-wiki/wireless-sensors-network/
8. Introduction to Wireless Sensor Networks. URL: https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE521
9. Recent Developments in Wireless Sensor Network Security. URL: https://arxiv.org/pdf/2404.11388
10. Application of WSN in Buildings. URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/856
11. Monitoring of Structures using WSN. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/7/2607
12. Continuous Seismic Monitoring of Cable-Stayed Bridge. URL: https://surl.li/fvcafl
13. Remote Pipeline Monitoring Security System. URL: https://surl.lu/akzapl
14. Recent Developments in Wireless Sensor Networks. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/6062
15. Тимофєєв Є.М., Лисенко О.І. Strategies for Using MIMO Technology in Mobile Sensor Networks. Modern Trends in the Development of Information Systems and Telecommunication Technologies: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. 2023. С. 85–87.

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I. AN ANALYTICAL REVIEW OF APPROACHES TO THE APPLICATION OF MIMO TECHNOLOGY FOR MONITORING CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

This article discusses approaches to the application of MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) *technology in wireless sensor networks* (*WSNs*) *to improve the efficiency of monitoring critical infrastructure facilities. The MIMO technology demonstrates high potential in providing stable and reliable communication, expanding the coverage area, increasing the throughput and energy efficiency of wireless systems, which makes it promising for use in the complex environment of critical infrastructure* (*CI*)*. The article systematizes the principles of operation, configurations and types of implementation of MIMO technology* (*including Massive MIMO, Cooperative MIMO and Virtual MIMO*)*, and also characterizes the architecture and features of the WSN.*

In recent years, there has been a rapid introduction of wireless sensor networks in various sectors of the economy and infrastructure to monitor objects located over large geographical areas. Thanks to the development of WSNs, a new approach to building smart surveillance systems has been formed that allows

real-time acquisition, transmission and analysis of information about the state of the environment, engineering structures and technical systems. These technologies are particularly relevant in the context of ensuring the stability and security of critical infrastructure, including energy complexes, transportation systems, water supply facilities, telecommunications, and other vital elements of national and economic importance.

However, traditional methods of monitoring such facilities are often costly, difficult to scale, and unable to provide continuous real-time monitoring. Wireless sensor networks offer a flexible, scalable, and cost-effective solution. However, their effective operation in the face of increased requirements for reliability, throughput, power consumption, and data security remains a major challenge. In this context, MIMO technology, which allows for the parallel transmission of multiple data streams over multiple antennas simultaneously, providing high channel performance without increasing transmitter power or frequency bandwidth, is becoming a key technological solution.

Key words: *MIMO, wireless sensor networks, critical infrastructure, monitoring, energy efficiency, data transmission security.*

UDC 004.77
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/15

Chukov O.O.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Redko I.V.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

CONTINUOUS DEPLOYMENT OF OTA UPDATES IN IOT SOLUTIONS

In this article, the challenges of applying continuous deployment in IoT solutions are examined in the context of OTA firmware updates. The traditional continuous deployment approach used in software development is not directly suitable for IoT environments due to limited device resources, unstable connectivity, and the need for careful, staged rollouts. The article highlights that most OTA updates in IoT solutions are still managed with manual intervention by humans (*experts*)*, which slows down the process and introduces risks related to human mistakes.*

To address these issues and apply continuous deployment approach to OTA updates in IoT, the article proposes a solution based on adding to OTA deployment workflow the Data-Processing and Decision Making unit, which automates all the routine work, putting an expert aside to only decide on the most critical decisions and perform the most critical operations. This unit is responsible for making rollout decisions at every stage, based on initial commands received from an expert, and data received from previous rollout iterations OTA and Device Operability status reports. The proposed solution addresses challenges of applying continuous deployment to IoT, like deployment scale, latency in feedback loops, rollback complexity, and brings to the IoT domain the benefits of continuous deployment, like reduced costs, accelerated feedback loop, and improved quality. The proposed solution is device-agnostic, presented as a high-level architecture diagram, and therefore doesn't contain details on protocols to be used and ways of implementation.

The article also highlights directions for future research, including formalising the parameters used across the deployment workflow, defining the rules and thresholds for rollout decisions, and validating the solution through real-world testing or simulations. These steps are important to ensure the applicability of the approach across different IoT systems and to bring the concept from design to practical implementation.

Key words: *Internet of Things, IoT, over the air update, OTA, firmware update, continuous deployment, device management.*

Formulation of the problem. The Internet of Things (IoT) is a new technology that connects electronic devices and sensors through the Internet to make our lives easier. IoT uses smart devices and the Internet to create solutions for different problems in business, government, and public and private sectors around the world. The increasing adoption of IoT underscores the need for efficient software management, as device functionalities must be updated and improved over time.

One of the most critical aspects of maintaining IoT devices is ensuring that they receive timely and secure software updates to provide security enhancements, bug fixes, performance optimisations, and feature extensions. Over-the-air (OTA) is the only practical approach for providing updates to IoT devices due to the large number of distributed devices, many of which operate in remote or restricted environments, often with no physical access to them.

Continuous deployment (CD) is one of the commonly used techniques for the delivery of software updates, with code changes to an application being released automatically into the production environment. While CD is widely used in cloud computing and web applications, its application to IoT remains complex due to the constraints of embedded systems and heterogeneous network environments. Implementing continuous deployment for OTA updates in IoT solutions requires careful planning, robust security measures, and an efficient rollout strategy.

This article examines the applicability of the CD technique for OTA updates in IoT networks. The article explores key challenges associated with CD in IoT, followed by a proposed solution workflow diagram, aiming to resolve or minimise the impact of those challenges. By integrating Continuous Deployment with IoT update

mechanisms, organisations can achieve greater efficiency, enhanced security, and improved user experiences in managing their connected devices.

Analysis of recent research and publications. The Internet of Things (IoT) is an emerging paradigm that enables the communication between electronic devices and sensors through the Internet in order to facilitate our lives. IoT uses smart devices and the internet to provide innovative solutions to various challenges and issues related to various business, governmental, and public/private industries across the world [1, p. 1].

A great transformation can be observed in our daily routine life along with the increasing involvement of IoT devices and technology. One such development of IoT is the concept of Smart Home Systems (SHS) and appliances that consist of internet-based devices, automation systems for homes, and reliable energy management systems. Besides, another important achievement of IoT is Smart Health Sensing system (SHSS), which incorporates small intelligent equipment and devices to support the health of the human being. IoT has brought up some new advancements to make transportation more efficient, comfortable and reliable. Intelligent sensors and drone devices are now controlling the traffic at different signalised intersections across major cities [1, p. 2].

IoT solutions are widely used across many business sectors and public services to improve efficiency and connectivity. Among all IoT projects, the top 5 by market share occupy Smart City (22%), Connected Industry (17%), Connected Building (12%), Connected Car (11%) and Smart Energy (10%) [2]. IoT projects are spread across the world, with the Americas making up most of those projects (45%), followed by Europe (35%), and Asia (16%).

Nowadays, IoT environments are characterised by the presence of a large number of devices, often massively deployed in an area of interest to enable an IoT application. However, because of device constraints (e.g, heterogeneity, resource limitations, etc.), IoT networks are experiencing many challenges, among the most relevant of which are the following [3, p. 39–42]:

Heterogeneity. The main objective of IoT is to create a common way to abstract heterogeneous devices and achieve the optimal exploitation of their functionality.

Scalability. It is one of the most important challenges of IoT, which means how to deal with the sustainable growth of the Internet in an efficient manner.

Security and privacy. Constant need of protecting data and systems from external attacks and internal misuse, while ensuring confidentiality, trust, and personal data protection.

Routing. This raises the task of selecting the best path between the source and the destination to complete the communication process successfully.

Interoperability. This concept can be defined as the ability to create systems or devices that efficiently cooperate with each other.

Networking. Traffic and protocols that have a significant impact on the behaviour of the network require a reliable and stable network connection.

Given the complexity of the listed challenges, efficient management of IoT networks becomes critical. To address these issues, various IoT network management solutions have been developed, offering tools for device monitoring, firmware and configuration updates, data collection, and system integration.

An overview of IoT network management frameworks, including Azure (from Microsoft), IBM

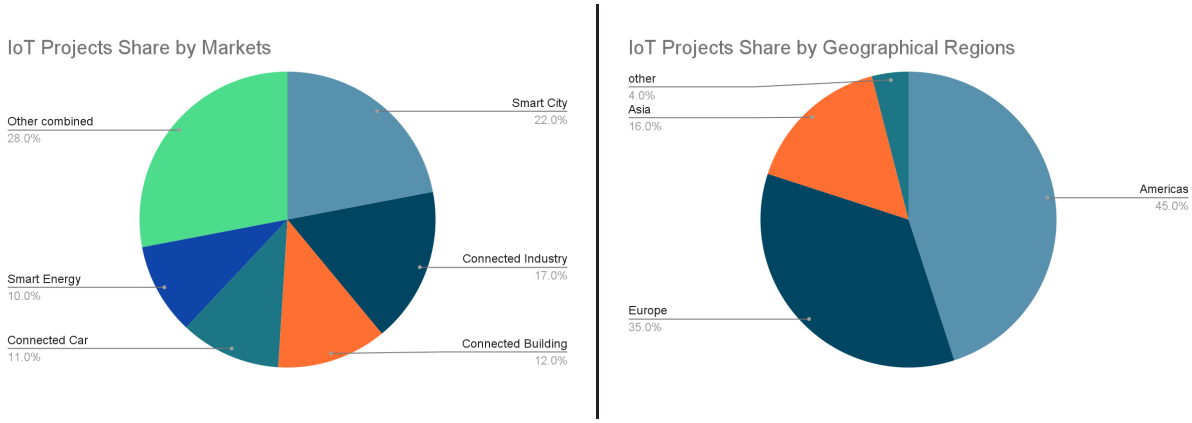


Fig. 1. IoT Projects Shares by Markets and Geographical Regions

IoT (from IBM), Artik Cloud (from SAMSUNG), Mbed (from Arm), Google Cloud Platform (from Google), AWS IoT (from Amazon), with a summary of their capabilities to perform data collection, device monitoring, network and device configuration, and communication protocols, is provided in Table 1 [4, p. 4165].

The firmware update mechanism is declared as part of the Device Management and is included in all of the listed IoT cloud platforms. A detailed overview of AWS IoT Device Management solution for automated deployment of updates to IoT devices is provided in Fig. 2 [5].

In the provided flow, the AWS IoT Device Management takes care of scheduling, retrying, and reporting the status of remote operations, like OTA update or device configuration. However, the update process is designed from the perspective of one device or small device fleets, and does not fully address the challenges of large-scale deployments. Issues like scalability to bigger device fleets, consisting of heterogeneous devices with differences

Table 1

IoT cloud platforms and their features

IoT cloud platform	Protocols for data collection	Management protocol	Device management	Device monitoring	Communication technologies	Resource constrained devices
Azure (Microsoft)	MQTT	LWM2M	✓	✓	–	✓
IBM IoT (IBM)	MQTT, HTTP	LWM2M	✓	–	–	✓
Artik Cloud (Samsung)	REST/ HTTP, websockets, MQTT, CoAP	LWM2M	✓	–	–	✓
Mbed (Arm)	HTTP, HTTPS, CoAP, MQTT	LWM2M	✓	–	BLE, Thread, 6LowPAN, Wi-Fi, LoRa	✓
Google Cloud Platform (Google)	MQTT	–	✓	✓	–	✓
AWS IoT (Amazon)	MQTT	–	✓	✓	–	✓

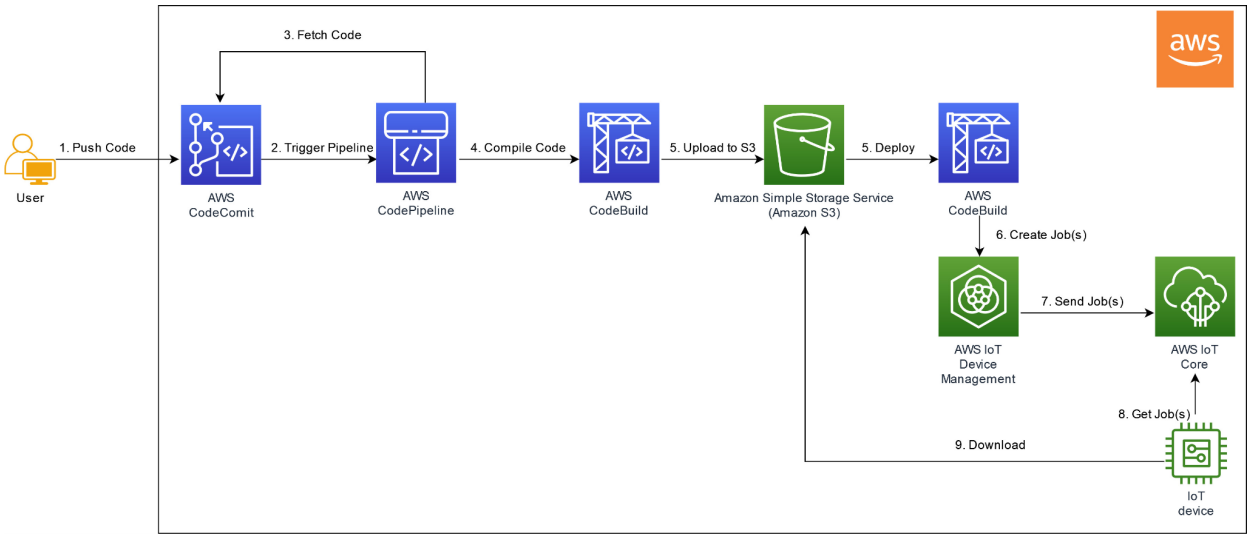


Fig. 2. AWS IoT Device Management Solution for IoT Devices Update

in hardware, operating in different environments, etc., remain on the customer side to implement. This leaves a gap that needs to be addressed through future research and the unification of the process of large-scale deployment of OTA updates.

To address the identified gap in IoT, it is important to explore software deployment techniques, which have proven effectiveness in non-IoT solutions, like Continuous Deployment. Continuous deployment (often abbreviated to CD) is a software development strategy where code changes to an application are automatically released into the production environment (Susnjara & Smalley, 2024). Not to be confused with continuous delivery, which shares the same acronym (CD), but is a software development practice where developers build software to release it into production at any time [6].

Traditionally, when we talk about continuous deployment, we think of deploying Web or Mobile apps [7]. Moreover, continuous deployment is often considered a must-have approach in software-based solutions. A list of benefits of continuous deployment that supports this statement is provided in Table 2 [6].

Task statement. IoT solutions cannot be referred to as software-based solutions in the way that is described in a previous section. IoT are embedded systems with embedded software, which is usually called firmware, so IoT are firmware-based solutions. The classical continuous deployment approach cannot be directly applied to IoT solutions due to the limitations and unique challenges it faces:

All this makes continuous deployment a desired but rather very challenging approach for IoT solutions. The task of firmware update in IoT solutions is still mostly done manually (or semi-manually), with a human (expert) to initiate the process and control it during its progress.

Taking into account the big scale of IoT networks with thousands or even millions of end devices, the deployment of OTA updates cannot be done at once. Updates are deployed iteratively, starting with a smaller pool of devices to get the update and

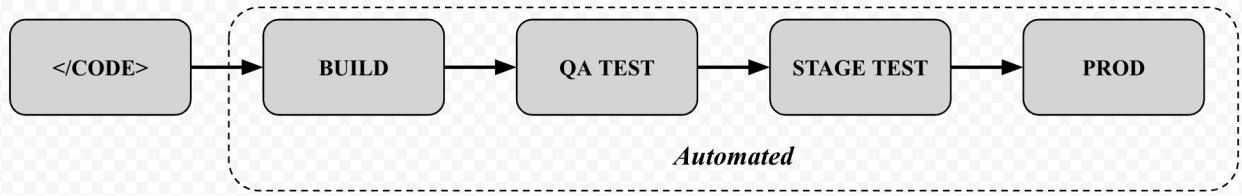


Fig. 3. High-level flow of releasing updates with the continuous deployment approach

Table 2

Benefits of continuous deployment

Accelerated feedback loop	Continuous deployment accelerates the feedback loop by allowing developers to release code changes frequently. This capability reduces the time that it takes to receive feedback from users and stakeholders.
Faster time to market	Continuous deployment helps deliver updates and software releases quickly. Once new updates pass predefined tests, the system automatically pushes them to the software's end users.
Better team collaboration	Continuous deployment frees up developers to focus more on writing code and performing tests rather than on manual deployment procedures. It also supports team collaboration and communication by providing a single view across all applications and environments.
Improved quality	Automated testing – the most critical dependency for continuous deployment – occurs at each stage of the deployment pipeline lifecycle. This capability improves the overall quality of the deployment experience. For instance, automated testing can debug errors before they reach production.
Enhanced customer experience	Automated testing allows development teams to quickly and consistently deploy new features and improvements for enhanced customer experience.
Reduced costs	Automating the deployment eliminates bottlenecks and reduces manual tasks. This process helps businesses save costs by reducing downtime.

Table 3

Challenges of continuous deployment in IoT solutions

Connectivity issues	IoT devices often operate in environments with unreliable or limited internet connectivity.
Resource constraints	Many IoT devices have limited computational power, memory, and storage.
Latency in feedback loops	Monitoring the effects of a deployment and gathering feedback from devices can be slow.
Rollback complexity	Rolling back a faulty update is more challenging for IoT devices due to potential device inaccessibility or constraints.
Deployment Scale	IoT ecosystems often involve thousands or millions of devices.

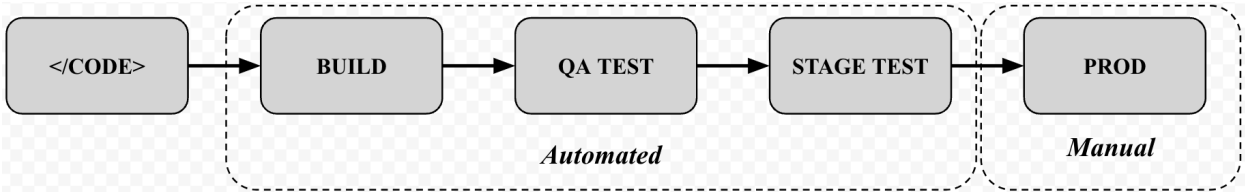


Fig. 4. High-level flow of releasing updates in IoT solutions

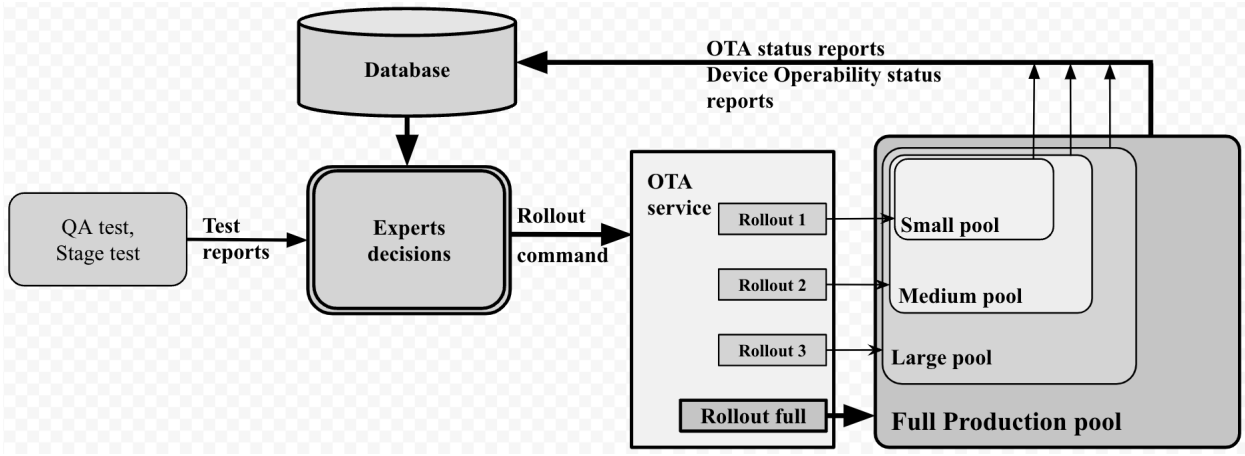


Fig. 5. Iterative deployment of OTA updates in IoT solutions

provide OTA and Device Operability status reports, which confirm the update is safe, and deployment can proceed to a larger pool of devices. A human (an expert) is set at the center of decision making for each iteration, with the tasks to launch the intial iteration, analyse output results from status reports, launch the next iteration if results satisfy criteria, pause the deployment if results are not clear and don't allow to decide on the next step, or break the deployment if results doesn't match criteria cor continuation.

The diagram of the iterative deployment of OTA update in the IoT networks with a human (an expert) at the centre is provided in the figure above.

Relying on an expert as the central decision-maker introduces delays in OTA deployment, limits scalability, and increases the risk of human error. Automating the deployment with the continuous deployment approach enables faster and more reliable updates, with other benefits provided by CD.

Outline of the main material of the study. To address the challenges of continuous deployment of OTA updates in IoT solutions, it is proposed to extend the iterative deployment flow by adding the Data Processing and Decision-Making (DPDM) unit, which makes all the decisions automatically.

Proposed concept puts DPDM into the center of the iterative deployment process, instead of a human (an expert), which still might be a part of the flow but only as a provider of additional input information (e.g., when to initiate update process, set desired schedule, define device's pool to target, etc.).

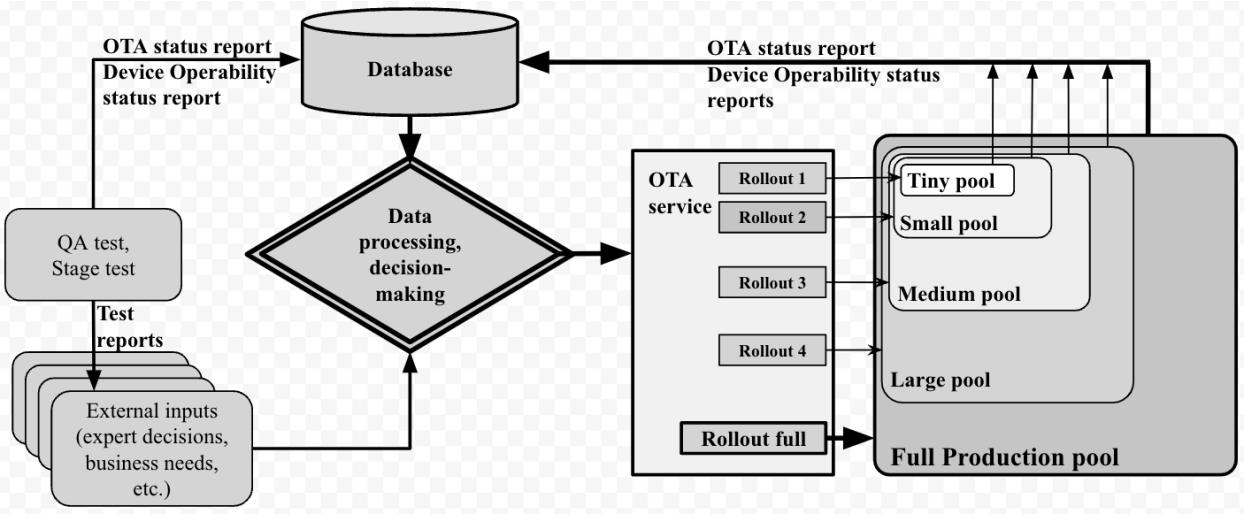


Fig. 6. Iterative deployment of OTA updates in IoT solutions with CD approach

The new flow could be divided into four major phases to explain the process of automated IoT updates.

On **Phase 1, the initiation of the deployment of the OTA update** happens. This could be done either automatically by triggering from the autorun service, or manually by a human (expert) to trigger the process. A set of input parameters should be passed to the DPDM unit to start the deployment, like:

- Quality Assurance (QA) test report, to ensure the update is stable, functional, and free of critical bugs, preventing failures or disruptions after deployment
- Stage test report, after verification of the new firmware in a production-like environment, ensuring it works correctly with real configurations and systems;
- OTA and Device Operability status reports generated during QA and Stage tests, provide initial information about IoT device's stability; this is the first set of data that is being processed by DPDM and taken into account while making the decision to initiate deployment
- Other inputs from a human (an expert) also might be provided, like:
  - Date and time to initiate deployment – this allows the start of deployment at the desired time, satisfying business needs, e.g., to complete by the announced date of update
  - Schedule of the rollout – this allows to avoid rollout stages execution during non-desired time slots, e.g., during peak load of IoT devices
  - Pool of devices to target – this allows deployment of updates to a certain desired pool, e.g., in a specific geographical region or owned by a specific customer
  - Priority criteria for picking up devices on each rollout stage – this allows to prioritise specific devices to be taken at first, e.g., from the Beta pool or devices equally distributed across regions

On **Phase 2, rollout of the OTA update to an initial pool (on the first iteration) and larger pools (on each next iteration)** happens. Based on input data received on Phase 1, DPDM communicates to the OTA service, sets exact parameters for the rollout, and awaits results from the next phases.

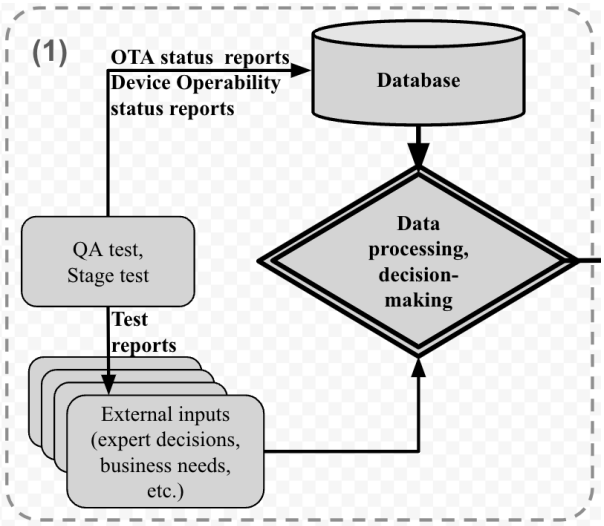
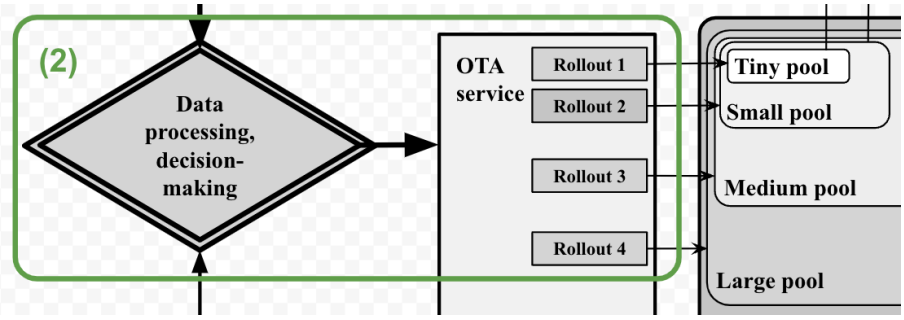
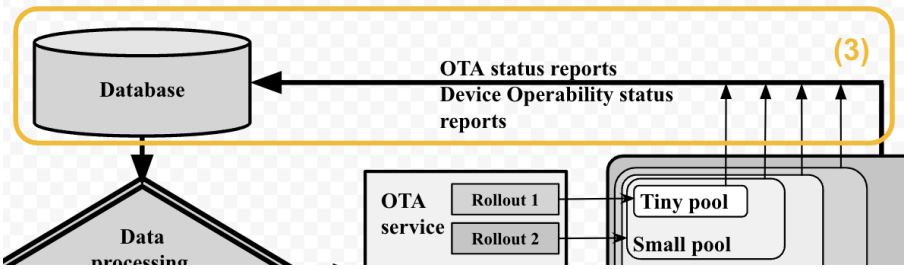
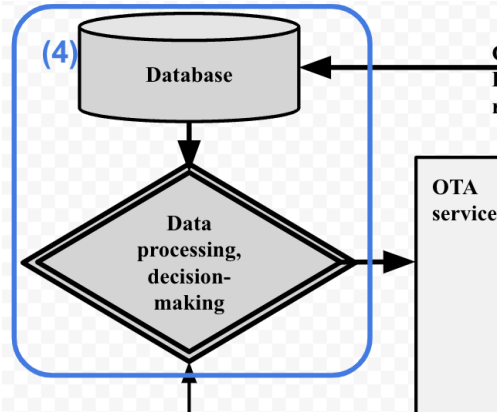
Parameters passed by the DPDM to the OTA service contain (but are not limited to) the following:

- Firmware version to be deployed – DPDM passes the version number, binary files, or link to files in the shared storage
- Pool of devices to be targeted – list of devices' unique identifiers, e.g., MAC addresses or Device Serial Numbers (DSN)
- Schedule, by which the rollout stage should be executed, e.g., exact time to start, or time range to execute
- Rollout severity – indicates whether to put this rollout stage higher in the queue of previously requested but not yet executed rollouts
- Other parameters might also be used, depending on implementation

The mechanism of the OTA updates heavily depends on many factors, like device type (manufacturer, model), used operating system (Linux, RTOS, bare metal software), communication channels (WiFi, Cellular, LoRa etc.), protocol used (MQTT, CoAP, HTTP etc.). In-depth reviews of OTA mechanisms and their use-cases are provided

Table 4

Phases of iterative deployment of OTA updates in IoT solution with CD approach

Phase	Diagram snippet
(1) Initiation of the deployment of OTA update.	
(2) Rollout of the OTA update to an initial pool (on iteration #1) and bigger pools (on each next iteration).	
(3) Collecting OTA and Device Operability status reports, putting them into the database, pre-processing.	
(4) Processing of the collected data from the previous iteration, making the decision on initiation of the next iteration (back to phase (2))	

in related articles [8, 9]. This part is not covered in the article, as the proposed solution is considered device-agnostic.

On **Phase 3, the collection of OTA status reports and Device Operability status reports** happens. Status reports provide feedback on device's current firmware version, health state, performance, and connectivity.

The OTA status report contains (but is not limited to) the following information:

- OTA success state – it indicates whether OTA has been performed successfully or failed; if failed at which stage
- OTA duration – how long it took for the device to perform OTA; this value is important especially for IoT devices which cannot operate during ongoing OTA, so this indicates for how long the device was out of regular operation
- OTA attempts device has spent on conducting the OTA
- Reason for refusing OTA update, e.g., low battery level, bad connection conditions, low temperature, etc.
- Other important parameters, required for monitoring in each specific business case, like energy consumed, traffic consumed, program flash occupation, etc.

The Device Operability status report content heavily depends on the device types and business cases they are used for. For instance, the IoT security camera with the motion detection and video streaming functionality in its Device Operability status report contains (but is not limited to) the following information:

- Motion detection rate – number of motion events detected during a day; this is important for understanding if a new firmware has changed motion detection performance
- Video streaming quality – a set of metrics indicating the quality of video, like resolution, bitrate, video codec used for encoding, etc.
- Network losses during streaming – indicates the quality of the network during streaming, like video packet loss, failed video streams, etc.
- Energy consumption for video streaming – indicates the power consumed for 1 min of video streaming; this is important for battery-powered cameras
- Online availability – indicates for how long the device stayed online and has been in an offline state

On **Phase 4, Processing of the collected data and making a decision on the initiation of the next iteration** happens. To make a decision on each subsequent rollout stage, DPDM retrieves data collected on the previous stage from the database, verifies it against a set of predefined criteria, and makes a decision on the next stage. If the criteria are not met or the results cannot be analysed by DPDM, it may reiterate the rollout stage on a smaller pool or request a human (expert) interaction.

Criteria that the results are verified against, contain (but are not limited to) the following:

- Devices outage rate is within the acceptable range – indicates the percentage of devices that stopped operating after rollout
- OTA success rate is within the acceptable range – indicates the percentage of devices that conducted OTA update successfully, and within an expected time range
- OTA metrics are within the desired range – data collected from the OTA status reports, after aggregation (e.g., to represent average value), remains within the expected range, which indicates OTA is conducted as expected
- Device Operability metrics are within the desired range – data collected from the Device Operability status reports from the updated device, after aggregation (e.g,. to represent average value), remains within the expected range, which indicates devices operate as expected

Discussion and Future Research. The proposed integration of a Data Processing and Decision-Making (DPDM) unit into the OTA update deployment workflow for IoT systems addresses several key limitations of manual, expert-driven deployment processes. By automating decision-making based on predefined criteria and real-time feedback from devices, the approach reduces human error, improves scalability, and enables faster rollout iterations. The continuous deployment approach becomes applicable to the IoT solutions by putting most of the work to the DPDM unit, but still maintains flexibility by allowing expert inputs at key stages such as deployment initiation and rollout scheduling.

The proposed solution directly addresses the key challenges associated with continuous deployment in IoT environments, mitigating them or lowering their impact.

The proposed solution was designed to be platform-agnostic, with no reference to specific IoT device types, their operating systems, supported OTA mechanisms, communication channels (e.g., Wi-Fi, cellular, LoRa), or protocols used (e.g., MQTT,

Table 5

Addressing challenges of continuous deployment in IoT solutions by proposed solution based on DPDM

Connectivity issues	Mitigated through staged rollouts and DPDM-driven retries or pauses, allowing the system to adapt to unreliable network conditions without compromising the entire deployment
Resource constraints	Considered during the planning and configuration of rollout stages, enabling the DPDM to avoid overloading limited devices by managing update timing and batch sizes
Latency in feedback loops	Significantly reduced by automating data collection and analysis via the DPDM, enabling quicker decision-making compared to human-centered evaluation
Rollback complexity	Handled by incorporating device health metrics and operational status checks before proceeding to wider rollouts, ensuring issues are detected early and contained within smaller pools
Deployment Scale	Addressed by the iterative, data-driven rollout mechanism, which allows scalable orchestration of updates across thousands or millions of devices with minimal human oversight and improved consistency

CoAP, HTTP). Also, the article provided examples of the parameters exchanged throughout the deployment workflow across its phases. One direction of future research would be to continue investigating the platform-agnostic direction and defining and formalising all parameters exchanged throughout the deployment workflow. Identifying these parameters, their data types, dependencies, and relevance to various deployment scenarios will be critical for improving interoperability, ensuring consistency, and enabling cross-platform automation.

Another important direction of future research is the definition and formalisation of the rules and thresholds the DPDM uses to evaluate collected data and make decisions on the next rollout stages. Without well-defined rules, the decision-making process risks becoming inconsistent, potentially leading to slow deployments and unnecessary rollbacks. Future research should focus on developing a flexible rule engine capable of handling different rules and thresholds, with both static and dynamic criteria, and allowing adjustment for adapting to different IoT solutions and business needs.

To validate the feasibility and performance of the proposed solution, future research might also include an approbation phase. This could begin by selecting a real-world IoT solution, such as an environmental sensor network of security cameras, as a reference case. The proposed architecture should then be adapted to the specific characteristics of this system, including its device types, OTA mechanisms, and communication infrastructure. Furthermore, the solution can be tested through simulation environments or a small-scale physical IoT network, built using development boards and test devices to mimic the large-scale network. This approbation will provide valuable information about the solution behaviour under real constraints, help adjust thresholds and criteria, and ensure the practical applicability of the proposed deployment approach.

Conclusions. This article explores the application of the Continuous Deployment (CD) approach to the delivery of over-the-air (OTA) firmware updates in Internet of Things (IoT) solutions. While CD is widely used in cloud and web development, its use in IoT is limited by specific challenges such as connectivity issues, resource constraints, and deployment scale. The article proposes a new solution based on an automated Data Processing and Decision-Making (DPDM) unit that replaces manual expert intervention in the OTA rollout process. The proposed framework divides the update process into four phases and provides a workflow for automating update decisions based on real-time device data. This approach improves update speed, scalability, and reliability, and helps make CD a practical and efficient method for managing IoT firmware updates.

Bibliography:

1. Kumar S., Tiwari P., & Zymbler, M. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big Data volume* 6*, Article number* 111. 2019. DOI: 10.1186/s40537-019-0268-2

2. Lueth K.L. The Top 10 IoT Segments in 2018 – based on 1,600 real IoT projects, 2018. URL: https://surl.li/usvmpo

3. Ali Z.H., Ali H.A., Badawy M.M. Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges, and Recent Research Directions. *International Journal of Computer Applications.* 128 (1) : 975-8887. 2015. P. 37–47.

4. Aboubakar M., Kellil M., Roux P. A review of IoT network management: Current status and perspectives. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences* 34. 2022. P. 4163–4176. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.03.006

5. Rehan S., Syed A.. Automate application deployment to IoT devices using AWS IoT Device Management. 2023. URL: https://surli.cc/lxrpfb

6. Susnjara S., Smalley, I. What is continuous deployment? 2024. URL: https://www.ibm.com/topics/continuous-deployment

7. Swirski A. What you need to know for CI/CD for the IoT. 2022. URL: https://beetlebox.org/what-you-need-to-know-for-ci-cd-for-the-iot/

8. Bauwens J., Ruckebusch P., Giannoulis S., Moerman I., De Poorter E. Over-the-Air Software Updates in the Internet of Things: An Overview of Key Principles. *IEEE Communications Magazine.* 58. 2020. P. 35–41. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900125.

9. Anurag T., Cory B., Poonam K. CoAP and MQTT Based Models to Deliver Software and Security Updates to IoT Devices over the Air. *2019 International Conference on Internet of Things* (*iThings*) *and IEEE Green Computing and Communications* (*GreenCom*) *and IEEE Cyber, Physical and Social Computing* (*CPSCom*) *and IEEE Smart Data* (*SmartData*)*, Atlanta, GA, USA.* 2019. P. 1065–1070. DOI: 10.1109/iThings/GreenCom/CPSCom/SmartData.2019.00183.

Чуков О.О., Редько І.В. БЕЗПЕРЕРВНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ OTA-ОНОВЛЕНЬ У IOT РІШЕННЯХ

У цій статті розглядаються виклики застосування безперервного впровадження (*Continuous Deployment*) *в IoT-рішеннях у контексті OTA-оновлень прошивки. Традиційний підхід CD, який використовується у розробці програмного забезпечення, не є безпосередньо придатним для середовища IoT через обмежені ресурси пристроїв, нестабільне з'єднання та необхідність обережного поетапного впровадження. У статті підкреслюється, що більшість OTA-оновлень в IoT-системах досі керуються вручну експертами, що уповільнює процес і створює ризики, пов'язані з людським фактором.*

Щоб подолати ці проблеми та застосувати підхід CD до OTA-оновлень в IoT, у статті пропонується рішення, засноване на додаванні до процесу OTA-оновлення модуля Обробки Даних та Прийняття Рішень (*Data-Processing and Decision Making, DPDM*)*. Цей модуль автоматизує всю рутинну роботу, залишаючи експерту лише найважливіші рішення та критичні дії. Модуль приймає рішення щодо впровадження на кожному етапі, опираючись на початкові команди експерта та дані, отримані з попередніх ітерацій впровадження, включно зі звітами про статус OTA та працездатність пристроїв.*

Запропоноване рішення вирішує низку проблем, пов'язаних із застосуванням CD в IoT, таких як масштаб впровадження, затримки у зворотному зв'язку, складність відкату, і водночас приносить переваги CD у сферу IoT – зниження витрат, пришвидшення циклу зворотного зв'язку та підвищення якості. Запропоноване рішення не залежить від типу пристроїв, подане у вигляді архітектурної схеми високого рівня і не містить конкретизації щодо використаних протоколів та способів реалізації.

Також у статті окреслено напрями подальших досліджень, зокрема формалізацію параметрів, що використовуються в процесі розгортання, визначення правил і порогових значень для прийняття рішень щодо впровадження, а також валідацію рішення шляхом реального тестування або моделювання. Ці кроки є важливими для апробації застосовуванності підходу в різних IoT-системах і для подальшого переходу від концепції до практичного впровадження.

Ключові слова: *Інтернет речей, IoT, оновлення по повітрю, OTA, оновлення прошивки, неперервне впровадження, управіння пристроями.*

УДК 621.396.946: 629.783
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/16

Юсипів Т.В.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Кисельов В.Б.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О.Г.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Омецинская Н.В.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Курилко О.Б.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Ця стаття присвячена аналізу та розробці математичних моделей систем розпізнавання мовлення, що базуються на використанні нечіткої логіки та нечітких множин. Розпізнавання мовлення є складною задачею через невизначеність, пов'язану з варіаціями мовлення, шумом і контекстними факторами. Нечітка логіка дозволяє моделювати ці невизначеності, надаючи інструменти для обробки мовних сигналів із частковою належністю до певних категорій, таких як «голос», «шум» чи «акцент». У статті розглядається постановка проблеми, яка полягає в необхідності створення ефективних моделей для обробки мовлення в реальному часі з урахуванням невизначеності. Аналізуються сучасні дослідження, які поєднують нечітку логіку з іншими методами, такими як нейронні мережі та приховані марковські моделі, для підвищення точності розпізнавання. Мета статті – розробити концептуальну модель системи розпізнавання мовлення, яка використовує нечіткі множини для класифікації та обробки аудіосигналів, а також оцінити її ефективність. У основній частині представлено теоретичні основи нечіткої логіки, описано процес моделювання (екстракція ознак, класифікація, прийняття рішень), а також наведено приклад алгоритму нечіткого кластерного аналізу для сегментації мовних сигналів. Особлива увага приділяється інтеграції нечітких систем із сучасними технологіями машинного навчання. Висновки підкреслюють переваги нечіткої логіки, зокрема її інтерпретованість і здатність працювати з невизначеністю, а також вказують на виклики, пов'язані з обчислювальною складністю та необхідністю оптимізації. Стаття пропонує рекомендації для подальших досліджень, зокрема щодо гібридних моделей і їх застосування в реальному часі. Список літератури включає ключові джерела з теорії нечітких множин, обробки сигналів і розпізнавання мовлення.

Ключові слова: *нечітка логіка, нечіткі множини, розпізнавання мовлення, математичне моделювання, обробка сигналів.*

Постановка проблеми. Розпізнавання мовлення є однією з ключових задач у галузі обробки сигналів і штучного інтелекту. Сучасні системи, такі як Siri, Google Assistant чи Alexa, покладаються на складні алгоритми для перетворення аудіосигналів у текст. Однак ці системи наразі стикаються з низкою проблем:

- невизначеність у мовленні: варіації вимови, акценти, інтонації та фонетичні особливості ускладнюють точну класифікацію мовних сигналів;
- шум і перешкоди: фонові шуми, такі як вуличний рух чи розмови, погіршують якість сигналу;
- контекстна неоднозначність: однакові звуки можуть мати різні значення залежно від контексту.

Традиційні методи, такі як приховані марковські моделі (HMM) або нейронні мережі, хоч і ефективні, проте часто потребують великих обсягів даних і не завжди здатні адекватно обробляти невизначену інформацію. У той же час, нечітка логіка, заснована на концепції нечітких множин,

пропонує альтернативний підхід, який дозволяє моделювати часткову належність сигналів до певних категорій (наприклад, «голос» чи «шум») і створювати інтерпретовані правила для обробки. Проблема полягає в розробці концептуальної основи для математичної моделі, яка б поєднувала переваги нечіткої логіки з вимогами реального часу та високою точністю розпізнавання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорія нечітких множин була описана в роботі Лотфі А. Заде [1] та наразі має дуже багато застосувань. Зокрема, останні дослідження в галузі розпізнавання мовлення вже активно використовують нечітку логіку для вирішення задач із невизначеністю. Зокрема можна прослідкувати такі етапи відповідних моделей:

– *класифікація сигналів*: Педрич [2] описує використання нечітких множин для класифікації аудіосигналів за типом (мовлення, музика, шуми). Нечіткі правила дозволяють адаптивно визначати «ступінь належності» сигналу до категорії;

– *гібридні моделі*: Джанг [3] розглядає нейронечіткі системи, які поєднують нечітку логіку з нейронними мережами для підвищення точності розпізнавання мовлення в шумних умовах;

– *біомедичні застосування*: Клір і Юань [4] показують, що нечіткі системи ефективні для аналізу мовних сигналів у медичних задачах, таких як діагностика порушень мовлення;

– *розпізнавання мовлення*: Заде в 2008 році [5] запропонував оптимізовані алгоритми нечіткої логіки для вбудованих систем, що важливо для портативних пристроїв розпізнавання мовлення.

Незважаючи на прогрес, більшість досліджень зосереджені на теоретичних аспектах, в той час як існуючі практичні реалізації часто стикаються з проблемами обчислювальної складності та необхідності експертного налаштування функцій належності. Це вказує на потребу в розробці концепції для побудови універсальної моделі, яка б поєднувала простоту нечіткої логіки з високою продуктивністю.

Постановка завдання. Метою статті є розробка концептуальної математичної моделі системи розпізнавання мовлення, що базується на нечіткій логіці та нечітких множинах. Модель має:

- забезпечувати стабільну обробку аудіосигналів із урахуванням невизначеності (шум, акценти);
- класифікувати та сегментувати мовні сигнали;
- бути адаптивною до реального часу та максимально сумісною з сучасними технологіями машинного навчання.

Метою статті є також оцінка переваг та обмежень запропонованої моделі, як і надання рекомендацій для її практичної реалізації.

Виклад основного матеріалу. Для подальшого викладу, наведемо деякі теоретичні основи нечіткої логіки. Як відомо, нечітка множина A в універсумі X визначається функцією належності $\mu_A(x) \in [0,\ 1]$, де $\mu_A(x)$ вказує на ступінь належності елемента x до множини A. Наприклад, для аудіосигналу 80 дБ з амплітудою x:

$$\mu_{\text{гучний}}(x) = 0.8\,, \quad \mu_{\text{тихий}}(x) = 0.2\,.$$

Основні операції з нечіткими множинами включають:

– об'єднання: $\mu_{A\cup B}(x) = \max\left(\mu_A(x),\ \mu_B(x)\right)$;

– перетин: $\mu_{A\cap B}(x) = \min\left(\mu_A(x), \mu_B(x)\right)$;

– доповнення: $\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x)$.

Нечітка логіка також використовує правила виду «ЯКЩО-ТО», що може бути корисним для розпізнавання різноманітної звукової інформації. Наприклад, наступне правило в термінах нечіткої логіки:

ЯКЩО *амплітуда висока* ТА *частота низька,* ТО *сигнал є голосом*.

Функції належності залежно від задачі можуть бути трикутними, трапецієподібними або навіть гауссовими. Конкретно для мовних сигналів найчастіше використовують трикутні функції через їхню простоту та обчислювальну ефективність. Їх вигляд наступний:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \le a \\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a < x \le b \\ \dfrac{c-x}{c-b}, & b < x \le c \\ 0, & x > c \end{cases}.$$

де a, , c – параметри, які визначають форму трикутника. Наприклад:

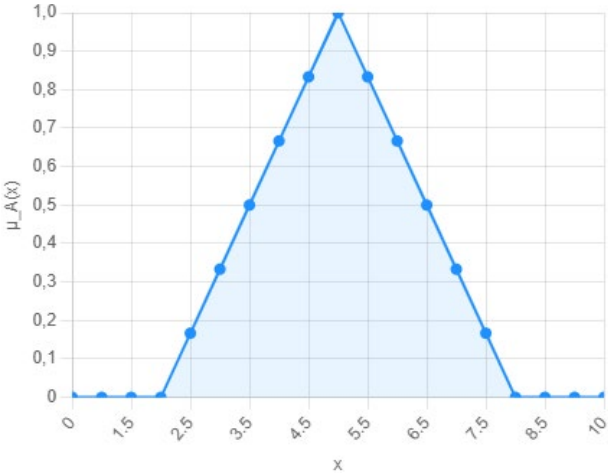


Рис. 1. Трикутна функція належності $\mu_A(x)$ для $a = 2$, $b = 5$, $c = 8$

Перейдемо до концепції моделювання системи розпізнавання мовлення. Запропонована модель має включати чотири основні етапи:

– *екстракція ознак*: з аудіосигналу «витягуються» ознаки, такі як мел-кепстральні коефіцієнти (MFCC, Mel-Frequency Cepstral Coefficients), частота основного тону, амплітуда, спектральна щільність і нульові переходи. MFCC є стандартним вибором, оскільки вони ефективно представляють спектральні характеристики мовлення;

– *нечітка класифікація*: отримані ознаки класифікуються за допомогою нечітких множин; для кожної ознаки (наприклад, амплітуди чи MFCC) визначаються множини типу «низька», «середня», «висока»; наприклад, для деякої амплітуди x:

низька: $\mu_{\text{низька}}(x)$, якщо $x \in [0,40]$ дБ,

середня: $\mu_{\text{середня}}(x)$, якщо $x \in [30,70]$ дБ,

висока: $\mu_{\text{висока}}(x)$, якщо $x \in [60,100]$ дБ;

аналогічно, для MFCC1 (перший коефіцієнт) можна визначити множини «голосна фонема», «приголосна фонема», «шум». Ступінь належності обчислюється також за трикутними функціями;

– *нечіткі правила*: створюються правила для визначення типу сигналу (мовлення, шум) або конкретних фонем. Приклад такого правила:
ЯКЩО *MFCC1 високий* ТА *амплітуда середня,* ТО *фонема є голосною* (загалом, правила формуються на основі експертних знань або даних тренування; так, наприклад для розпізнавання голосних звуків [а], [е], [і] створюється набір правил, що враховують MFCC і частоту основного тону; загальна кількість правил залежить від складності задачі, але зазвичай може становити 10–50 для базової системи);

– *прийняття рішень* (*дефазифікація*): нечіткі висновки (наприклад, ступені належності до фонем) перетворюються в чіткий результат (текст або клас сигналу) за допомогою методу дефазифікації; найпоширенішим є метод зважених коефіцієнтів:

$$y = \frac{\sum(\mu_i \cdot y_i)}{\sum \mu_i},$$

де μ_i – ступінь належності до класу i, y_i – відповідне значення (наприклад, ідентифікатор фонеми); результатом прийняття рішень є послідовність фонем або текст.

Опишемо детальніше роботу алгоритмів сегментації та класифікації. Для сегментації аудіопотоку на мовні та немовні сегменти пропонується використовувати добре відомий нечіткий кластерний аналіз (Fuzzy C-Means, FCM). Даний алгоритм групує аудіофрейми в кластери («мовлення», «шум», «тиша») на основі їхніх ознак (MFCC, енергія сигналу). Основні кроки такі:

1) ініціалізація k центрів кластерів (наприклад, для випадку «мовлення», «шум», «тиша» $k = 3$);

2) обчислення ступеня належності μ_{ij} для кожного фрейму i до кластера j:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{s=1}^{k} \left(\frac{|x_i - c_j|}{|x_i - c_s|} \right)^{\frac{2}{m-1}}},$$

де x_i – вектор ознак фрейму, c_j – значення центра кластера, m – параметр нечіткості (зазвичай $m = 2$);

3) оновлення значень центрів кластерів:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mu_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^{N} \mu_{ij}^m};$$

4) повторення кроків 2–3 до збіжності (зміна центрів менша за поріг).

Після сегментації кожен мовний сегмент класифікується за допомогою нечітких правил. Наприклад, для розпізнавання фонем алгоритм FCM може групувати фрейми в кластери, що відповідають голосним або приголосним звукам, а нечіткі правила уточнюють, чи є звук [а], [е] чи [і].

Перейдемо до розгляду інтеграції з машинним навчанням. Для підвищення точності модель інтегрується з нейронними мережами, формуючи нейро-нечітку систему. Структура такої системи зазвичай наступна:

Нейронна мережа: витягує ознаки з аудіосигналу (наприклад, глибока мережа типу згортки обробляє спектрограми для отримання MFCC-подібних ознак).

– Нечітка логіка: класифікує ознаки за допомогою нечітких правил і формує інтерпретовані висновки.

– Зворотний зв’язок: результати нечіткої класифікації використовуються для донавчання нейронної мережі.

Приклад реалізації: нейронна мережа (CNN) обробляє спектрограму аудіофрейму та видає вектор ознак (скажімо, 128-мірний). Цей вектор подається в нечіткий класифікатор, який визначає, чи є фрейм «мовленням» $\mu_{\text{мовлення}} = 0.9$ чи «шумом» $\mu_{\text{шум}} = 0.2$ за відповідною нечіткою ознакою. Правила формуються автоматично

шляхом аналізу даних тренування за допомогою алгоритму типу ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Такий гібридний підхід забезпечує баланс між точністю (завдяки нейронним мережам) та інтерпретованістю (завдяки нечіткій логіці). Наприклад, у порівнянні з чисто нейронними моделями (як-от Deep Speech), нейро-нечітка система дозволяє пояснити, чому певний фрейм класифіковано як голосна фонема.

Розглянемо тепер окремо систему розпізнавання голосних звуків [а], [е], [і] у зашумленому середовищі. Вхідний сигнал – це аудіопотік із частотою дискретизації 16 кГц на який накладений білий шум (SNR = 10 дБ). В такому разі алгоритм працюватиме наступним чином:

1) попередня обробка: сигнал розбивається на фрейми тривалістю 20 мс із перекриттям 10 мс; для кожного фрейму обчислюються 13 MFCC і енергія сигналу;

2) сегментація: алгоритм FCM групує фрейми в три кластери («мовлення», «шум», «тиша»); фрейми з $\mu_{\text{мовлення}} > 0.7$ передаються на класифікацію;

3) нечітка класифікація: для кожного мовного фрейму обчислюються ступені належності до множин «голосна [а]», «голосна [е]», «голосна [і]» на основі MFCC1 і MFCC2;

4) дефазифікація: метод зважених коефіцієнтів визначає остаточний клас фонеми (наприклад, якщо $\mu_{[a]} = 0.8$, $\mu_{[e]} = 0.3$, $\mu_{[i]} = 0.1$, фрейм класифікується як [а]);

5) постобробка: послідовність фонем згладжується для усунення помилкових переходів (скажімо, за допомогою медіанного фільтра).

Описана система у шумному середовищі може досягти точності порівнянної з HMM-моделями, тобто приблизно 85%, проте вона має перевагу в інтерпретованих правилах і не потребує надто багато даних для тренування.

Опишемо переваги та обмеження моделі. Переваги наступні:

1) «Інтерпретовність»: нечіткі правила дозволяють пояснити рішення системи.

2) Обробка невизначеності: модель ефективно працює в шумних умовах і з варіаціями мовлення (акценти, діалекти).

3) Гнучкість: нечіткі правила легко адаптуються до нових задач шляхом додавання нових множин або правил.

4) Інтеграція з ML: гібридний підхід підвищує точність без втрати можливості інтерпретувати результат.

Обмеження:

– Складність налаштування: визначення функцій належності та правил вимагає експертних знань або автоматизованих методів (як було зазначено, може бути використано ANFIS).

– Обчислювальна складність: нечітка класифікація та FCM можуть бути повільними для великих аудіопотоків у реальному часі.

– Обмежена масштабованість: для розпізнавання складних мовних конструкцій (фраз, речень) потрібна інтеграція з мовними моделями.

Додатково слід зазначити, що запропонована модель має кілька унікальних особливостей, які відрізняють її від існуючих підходів до розпізнавання мовлення:

– *Адаптивна сегментація з використанням Fuzzy C-Means*: На відміну від традиційних методів сегментації (наприклад, на основі енергії сигналу або HMM), використання FCM дозволяє враховувати нечітку природу аудіосигналів. Це підвищує точність виділення мовних сегментів у шумних умовах, оскільки кожен фрейм може частково належати до кількох класів («мовлення», «шум»). Порівняно з методами, описаними в [2], даний підхід оптимізує FCM для реального часу шляхом зменшення кількості ітерацій і використання трикутних функцій належності.

– *Гібридна нейро-нечітка архітектура*: Хоча нейро-нечіткі системи вже використовувалися в розпізнаванні мовлення [3], запропонована модель унікальна завдяки інтеграції згорткових нейронних мереж (CNN) для екстракції ознак і нечіткої логіки для класифікації. Це дозволяє поєднувати високу точність CNN із інтерпретованістю нечітких правил, що є новим у контексті шумозахищеного розпізнавання мовлення.

– *Автоматизоване формування правил*: На відміну від традиційних нечітких систем, де правила створюються вручну, модель використовує ANFIS для автоматичного навчання правил на основі даних тренування. Це зменшує залежність від експертних знань і робить модель більш універсальною для різних мов і діалектів.

– *Фокус на реальний час*: Модель оптимізована для вбудованих систем шляхом використання спрощених функцій належності (трикутних замість гауссових) і зменшення кількості правил (10–50 замість сотень, як у деяких системах, як писано в [4]). Це робить її придатною для портативних пристроїв, таких як смарт-динаміки чи слухові апарат.

– *Інтерпретовність для спеціалізованих застосувань*: у порівнянні з «чорними скриньками», якими є глибокі нейронні мережі (наприклад, з моделями, застованими на Transformer), запропонована модель забезпечує логічне пояснення рішень (наприклад, «фрейм класифіковано як [a], тому що MFCC1 високий»).

Висновки. Запропонована модель розпізнавання мовлення на основі нечіткої логіки демонструє ефективність у задачах із невизначеністю, таких як обробка шумних аудіосигналів або мовлення з акцентами. Нечіткі множини дозволяють створювати інтерпретовані правила для класифікації та сегментації сигналів, що є перевагою порівняно з «чорними скриньками» нейронних мереж. Інтеграція з машинним навчанням (нейронечіткі системи) підвищує точність і робить модель придатною для реального часу. Однак виклики, пов'язані з обчислювальною складністю та налаштуванням, потребують подальших досліджень. В зв'язку з чим рекомендується:

– оптимізувати алгоритми для вбудованих систем;

– розвивати гібридні моделі, що поєднують нечітку логіку з глибоким навчанням;

– дослідити застосування квантової нечіткої логіки для надшвидкої обробки.

Новизна моделі полягає в поєднанні унікальних особливостей (адаптивна сегментація, гібридна нейро-нечітка архітектура, автоматизоване формування правил, фокус на реальний час та інтерпретованість для спеціальних застосувань) у єдиній моделі. Порівняно з HMM (обмежена обробка невизначеності) і нейронними мережами (низька інтерпретованість), модель пропонує певний баланс, що відкриває нові можливості для застосувань у портативних пристроях і спеціалізованих системах.

Список літератури:

1. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. No. 3. P. 338–353. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

2. Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing. Wiley & Sons, Limited, John, 2007. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/9780470168967

3. Jang J. S. R., Sun C. T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing-A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence [Book Review]. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1997. Vol. 42. No. 10. P. 1482–1484. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TAC.1997.633847

4. Klir, G. J., & Yuan, B. Fuzzy set theory: Foundations and applications. Prentice Hall, 2006.

5. Zadeh L. A. Is there a need for fuzzy logic?. *Information Sciences*. 2008. Vol. 178. No. 13. P. 2751–2779. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2008.02.012

6. Teodorescu H.-N. Fuzzy Logic in Speech Technology - Introductory and Overviewing Glimpses. *Fifty Years of Fuzzy Logic and its Applications*. Cham, 2015. P. 581–608. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19683-1_28

7. H. V., M. A. Fuzzy Speech Recognition: A Review. *International Journal of Computer Applications*. 2020. Vol. 177. No. 47. P. 39–54. DOI: http://dx.doi.org/10.5120/ijca2020919989

Yusypiv T.V., Kyselov V.B., Guida O.G., Ometsinska N.V., Kurylko O.B. MATHEMATICAL MODELING OF SPEECH RECOGNITION SYSTEMS BASED ON FUZZY LOGIC

This article is dedicated to the analysis and development of mathematical models for speech recognition systems based on the use of fuzzy logic and fuzzy sets. Speech recognition is a complex task due to uncertainties associated with variations in speech, noise, and contextual factors. Fuzzy logic enables the modeling of these uncertainties, providing tools for processing speech signals with partial membership in specific categories, such as «voice,» «noise,» or «accent.» The article addresses the problem statement, which involves the need to create efficient models for real-time speech processing while accounting for uncertainty. It analyzes contemporary research that combines fuzzy logic with other methods, such as neural networks and hidden Markov models, to improve recognition accuracy. The purpose of the article is to develop a conceptual model of a speech recognition system that utilizes fuzzy sets for the classification and processing of audio signals, as well as to evaluate its effectiveness. The main section presents the theoretical foundations of fuzzy logic, describes the modeling process (*feature extraction, classification, decision-making*)*, and provides an example of a fuzzy clustering algorithm for segmenting speech signals. Special attention is given to the integration of fuzzy systems with modern machine learning technologies. The conclusions highlight the advantages of fuzzy logic, particularly its interpretability and ability to handle uncertainty, while also noting challenges related to computational complexity and the need for optimization. The article offers recommendations for further research, particularly regarding hybrid models and their real-time applications. The reference list includes key sources on fuzzy set theory, signal processing, and speech recognition.*

Key words: *fuzzy logic, fuzzy sets, speech recognition, mathematical modeling, signal processing.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.181
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/17

Воінов О.П.
Одеська державна академія будівництва та архітектури

Елькін Ю.Г.
Одеська державна академія будівництва та архітектури

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ КОТЕЛЬНО-ТОПКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Метою статті є аналіз існуючих перспективних котельно-топкових технологій спалювання твердого палива та одержаних результатів дослідження технологічного процесу у котлах з киплячим шаром. Розглянуто актуальність спалювання вугілля в Україні та обумовлюючі її фактори, від історичного контексту до соціальних та економічних аспектів. Акцентовано увагу на необхідності знаходити оптимальний баланс між потребами в енергозабезпеченні та дотриманням екологічних норм. Перехід до чистих джерел енергії потребує комплексного підходу та довгострокового планування. Ринок твердопаливних котлів на деревині, агровідходах та біопаливі демонструє зростання та динамічний розвиток. Діюче обладнання котельнь потребує оновлення та розвитку на основі застосування високоефективних котельно-топкових технологій. Необхідним є розвиток структури паливно-енергетичного балансу енергетики з урахуванням збільшення частки енергетичного твердого палива. Підвищення технологічної ефективності котельно-топкових систем можливе як шляхом оновлення існуючого обладнання, так і шляхом створення нового досконалого обладнання. Розвиток парку котлів у вітчизняній енергетиці слід здійснювати на основі використання прогресивних, перспективних котельно-топкових технологій. Такими прогресивними технологіями є використання об'ємно-охолоджуваної топки, киплячого шару, низькотемпературного спалювання та спалювання під підвищеним тиском. Поєднання перших трьох технологій є найбільш доцільним, пріоритетним для випадків спалювання палива всіх видів і сортів. Технологія спалювання під підвищеним тиском є доцільною при використанні газоподібного та рідкого палива. Істотним результатом вивчення технологічного процесу котлів з киплячим шаром стала розробка концепції управління процесом зовнішньої ерозії. Виконані дослідження дозволили запропонувати шляхи та засоби підвищення технологічної ефективності котлів з киплячим шаром під час роботи на низькоякісному твердому паливі, у тому числі суттєво підвищити стійкість поверхонь нагріву до впливу зовнішньої ерозії.

Ключові слова: *котельно-топкові технології, тверде паливо, вугілля, біомаса, екологічність, об'ємне охолодження топки, киплячий шар, низькотемпературне спалювання, зовнішня ерозія.*

Постановка проблеми. Незважаючи на світові тренди, спрямовані на перехід до чистих джерел енергії, спалювання вугілля займає важливе місце в енергетичному секторі України. Актуальність спалювання вугілля в Україні має економічні, соціальні та екологічні причини.

Історично в Україні вугілля було одним із основних енергетичних ресурсів. І хоча вугільна галузь зіткнулася з безліччю труднощів, і насамперед із війною, включаючи закриття шахт та зниження попиту, вона все ще зберігає своє значення для енергетичного балансу країни.

Однією з ключових причин збереження актуальності спалювання вугілля в Україні є прагнення до енергетичної незалежності. Країна історично залежала від імпорту газу. Після 2014 року необхідність зменшити залежність від зовнішніх його поставок стала одним із пріоритетних завдань. Спалювання внутрішнього вугілля дозволяє не лише знизити залежність від імпорту газу, а й створити нові робочі місця у вугільній галузі, що стимулює розвиток регіонів, де розташовані вугільні шахти. Таким чином, вугілля є важливим елементом у стратегії забезпечення енергетичної безпеки країни.

Спалювання вугілля в Україні також зумовлене його економічною доступністю. Вугілля залишається одним з найдешевших джерел енергії в порівнянні з газом або відновлюваними джерелами. Це робить вугілля привабливим, особливо в контексті зростання конкуренції на енергетичному ринку. В умовах значних фінансових навантажень використання вугілля дозволяє скоротити витрати, зберігаючи цінову конкурентоспроможність.

Вугільна галузь надає трудові місця проживаючим у регіонах, багатих на вугілля. Перехід на «зелену» енергетику без попереднього планування може призвести до серйозних соціальних наслідків у вугільних регіонах. Тому важливим є сталий перехід на чисті джерела. На найближчі десятиліття спалювання вугілля залишатиметься важливою частиною енергетичної системи України. У східних областях воно може залишитись і далі.

Крім того, сонячні та вітрогенератори суттєво залежать від природних циклів, а отже вимагають створення масштабних систем зберігання енергії. Сучасні акумулятори при всій їх ефективності занадто дорогі та ресурсномісткі для глобального впровадження. Враховуючи поточний рівень вугільного виробництва та споживання, не лише економічні фактори, а й соціальні аспекти збережуть актуальність спалювання вугілля.

Спалювання вугілля пов'язане з погіршенням екологічної ситуації. Проте вугільні електростанції в Україні орієнтовані на впровадження сучасних технологій очищення викидів, щоб мінімізувати їх шкідливий вплив на довкілля. І хоча на сьогоднішній день в Україні не залишилося жодної теплової електростанції, яка б не була пошкоджена або повністю зруйнована війною, у відновному післявоєнному періоді впровадження сучасних технологій очищення викидів тепловими електростанціями збереже актуальність.

Перспективним в Україні також є використання інших видів твердого палива і, насамперед, з біомаси, агровідходів та біопалива, для подолання енергетичної залежності та зміни структури споживання енергоресурсів ближче до моделі сталої енергетики. Україна має великий потенціал використання як палива сільськогосподарських відходів (соломи, лушпиння соняшника, кукурудзяних качанів тощо), лісового ресурсу, біопалива (пелет, агропелет тощо).

У цих умовах використання твердопаливних котлів (Кт) є одним із шляхів досягнення енергетичної автономії, особливо в аграрному та переробному секторах. Ринок таких Кт розвивається та пристосовується до сучасних вимог ефективності, екологічності та зручності використання [1].

Програми від ЄС, німецького товариства міжнародного співробітництва GIZ, агентства США з міжнародного розвитку USAID тощо фінансують використання твердопаливних Кт на промислових та муніципальних об'єктах.

В Україні є виробники промислових твердопаливних Кт, які забезпечують високу ефективність топкового процесу та низький рівень викидів шкідливих речовин [2–4]. Дехто з них навіть експортує продукцію.

Розглянемо стан вітчизняного котельного обладнання.

Істотною особливістю котельних відділень ТЕС та промислово-опалювальних котельнь є той факт, що більше 80% встановлених у них Кт відпрацювало розрахунковий ресурс і знаходиться в граничному стані [5]. Відповідно до чинного стандарту, подібні агрегати не доцільно ні експлуатувати, ні ремонтувати. Їх необхідно замінити на нові Кт.

Зношене обладнання потребує спеціалізованого технічного (експлуатаційного та ремонтного) обслуговування, з урахуванням основних положень технічної геронтології [6].

У котельних відділеннях ТЕС встановлені великі енергетичні Кт сучасних параметрів пари. Водогрійні Кт відрізняються від парових Кт ширшою різноманітністю типів теплової та конструктивної схем.

Звертає на себе увагу невисокий ступінь автоматизації котельних установок. При їх експлуатаційному обслуговуванні, а також у звітних матеріалах котельнь відомості про екологічні показники функціонування котельно-топкового обладнання не значяться.

Загалом фактичний стан обладнання парку енергетичних та промислово-опалювальних котельнь відстає від рівня вимог світовій енергетики.

Говорячи про ефективність використання існуючих котельно-топкових систем (КТС), слід зазначити, що ефективність технічних об'єктів – поняття комплексне, характеризується соціальною і технологічною складовими.

Остання формується екологічною, економічною та загальнотехнічною ефективністю. Найважливішою складовою є ступінь екологічності.

Показники функціонування зношених Кт, і насамперед екологічна ефективність, – нижчі

за рівень сучасних вимог. Це особливо важливо тому, що енергетика є основним забруднювачем природного середовища. На її частку припадає, як відомо, шкідливих викидів ~ 48%, шкідливих скидів ~ 27%, твердих відходів > 70%, викиду парникових газів до 70% [7].

У загальному обсязі шкідливого впливу котельнь на природне середовище при приблизно однаковій кількості спалюваного палива станційними агрегатами і промисловими агрегатами на частку останніх припадає значно більша частина відповідальності за шкоду, що приноситься.

Ефективність використання палива в КТС визначається дією низки факторів: видом та сортом палива; ступенем технічної досконалості технології та застосовуваного котельно-топкового обладнання, його станом; режимом функціонування котельнь; технічною культурою експлуатаційного та ремонтного обслуговування котельних установок.

При оцінці ефективності використання обладнання необхідно враховувати соціальну та технологічну її складові. В останній основну увагу слід приділяти оцінці ступеня екологічної досконалості технічних об'єктів [8].

Практично, усереднена ефективність функціонування промислово-опалювальних котельнь, особливо на твердому паливі, – відносно низька. Високий рівень зносу Кт не дозволяє підняти технічну культуру їх обслуговування, отже, і їх ефективність.

Важливим завданням вітчизняної енергетики та енергетичного машинобудування є підвищення технологічної ефективності КТС у станційній та промисловій енергетиці.

Структура паливно-енергетичного балансу вітчизняної енергетики оцінюється такими даними за станом на 2022 рік (рис. 1, 2) [9].

Частка імпортного газового і рідкого палива, дуже дорогого на світовому ринку, що досягає майже половини спалюваного палива (в умовному паливі), підвищує ціну вироблюваних електрики і теплоти. Нинішня структура балансу має бути визнана несприятливою.

Генеральною лінією розвитку енергетики, як станційної, так і промислової, слід вважати цілеспрямоване, планомірне збільшення частки

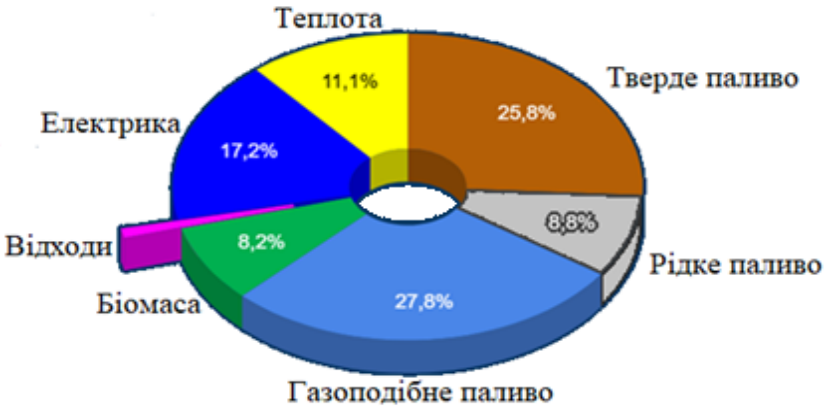


Рис. 1. Структура виробництва енергоносіїв в Україні

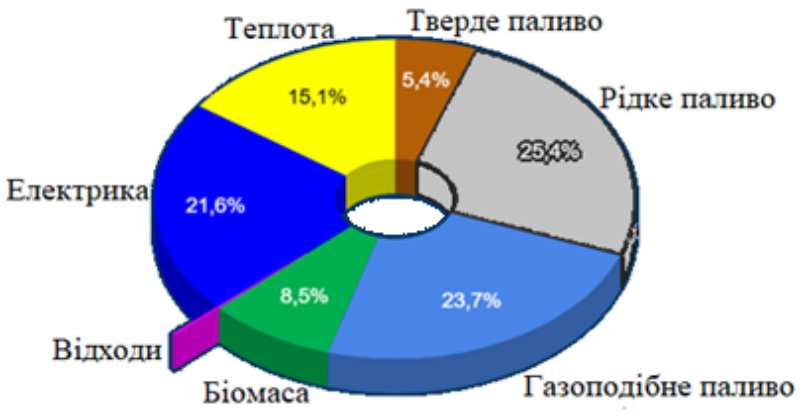


Рис. 2. Структура кінцевого енергетичного споживання

твердого палива в паливно-енергетичному балансі галузі. Першочерговому використанню підлягає тверде вітчизняне паливо як основне первинне джерело енергії.

При цьому, як відомо, в енергетику доцільно спрямовувати енергетичне тверде паливо, що відрізняється низькою якістю. Паливо високої якості (кондиціоновано) слід використовувати в інших галузях економіки.

Актуальним є дослідження шляхів підвищення технологічної ефективності КТС на твердому паливі.

Доцільним у нинішніх умовах є здійснення програми підвищення технологічної ефективності застосовуваних КТС, що складається з двох самостійних частин:

– програма А – підвищення ефективності на основі оновлення існуючих Кт та котельних установок,

– програма Б – підвищення ефективності на основі створення та використання нового, сучасного, перспективного обладнання.

Обидві програми мають спиратися на застосування високоефективних, перспективних, пріоритетних котельно-топкових технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поглиблений науково-технічний аналіз доступних даних показав, що серед відомих котельно-топкових технологій підвищеним ступенем досконалості привертають увагу лише деякі. Зазначимо найцікавіші:

– технологія застосування об'ємно-охолоджувальної топки (ООТ) [10],

– технологія киплячого шару (КШ) [11, 12],

– технологія низькотемпературного спалювання (НТС) [13],

– технологія спалювання під підвищеним тиском (СПТ) [14].

Кожна з них несе у собі суттєву новизну та широкі можливості підвищення технологічної ефективності котельно-топкового процесу. Ступені вивченості кожної з цих технологій різні, ступінь промислового освоєння, масштаб застосування їх у котельній техніці – також різні.

Найбільший інтерес становлять технології, що поєднують у собі деякі із зазначених вище. Вони набули характеру пріоритетних технологій.

Технологія застосування об'ємно-охолоджувальної топки

Технологія застосування ООТ дозволяє суттєво підвищити ступінь екологічної та економічної ефективності котельно-топкового процесу під час роботи на паливі всіх видів, в агрегатах будь-якої одиничної потужності. Ця технологія є основою створення КТС четвертого покоління. Це надає технології ООТ пріоритетного характеру.

Поверхні нагріву ООТ працюють значно ефективніше, ніж традиційні настінні та двосвітні топкові екрани (рис. 3).

ООТ відрізняються від поверхнево-охолоджуваних топок високим ступенем екологічної ефективності, насамперед після виходу оксидів азоту [15].

Переведення оновлюваних котлів традиційних типів на технологію ООТ (рис. 4) зумовлює отримання суттєвого позитивного технологічного ефекту. Створення нових КТС на основі використання технології ООТ дозволяє отримати агрегати четвертого покоління, що становлять пріоритетну лінію розвитку котельно-топкової техніки. Ці положення відносяться до котлів різної одиничної потужності.

Технологія киплячого шару

Технологія КШ є найефективнішою у поєднані із технологією НТС. Вона дозволяє отримати високий технологічний ефект функціонування Кт на паливі будь-якого виду та сорту,

1 – настінний радіаційний екран;

2 – двосвітній екран;

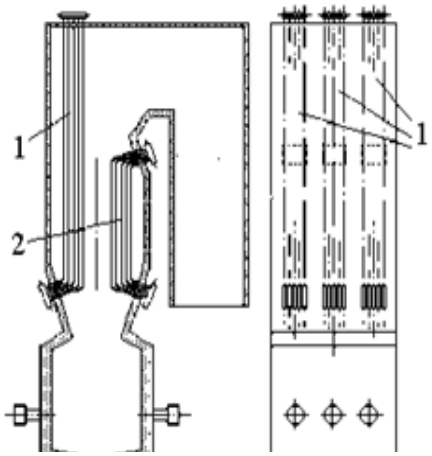
3 – труби всебічного обігріву;

S – крок труб;

d – довжина ряду;

$x_{тр}$, x_p – теплова ефективність труб та ряду відповідно

Рис. 3. Вплив відносного кроку труб S/d у ряді на їх відносну теплову ефективність $x_{тр}/x_p$



1 – передній, 2 – задній модуль

Рис. 4. Компоновка ООТ котла ТПП-210А

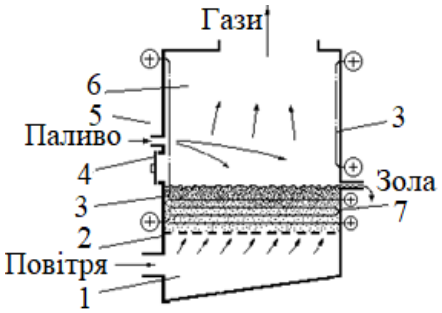
включаючи тверде низькоякісне (у тому числі рекордно високозольне, а також високосірчисте) паливо. Дана технологія має риси пріоритетного вирішення завдання вибору доцільної КТС для високоефективного використання низькоякісного твердого палива та відходів вуглезбагачення у вітчизняній енергетиці. Зазначені властивості технології КШ притаманні бульбашковому КШ (БКШ) (рис. 5), характерному для промислової енергетики [16].

Також зазначені властивості технології КШ притаманні циркулюючому КШ (ЦКШ) (рис. 6), характерному для енергетики станційної та великої промислової [17]. Перший в Україні енергетичний Кт із ЦКШ почав працювати в 2004 році на Старо-Бешівській ТЕС Донбасенерго.

Технологія низькотемпературного спалювання палива

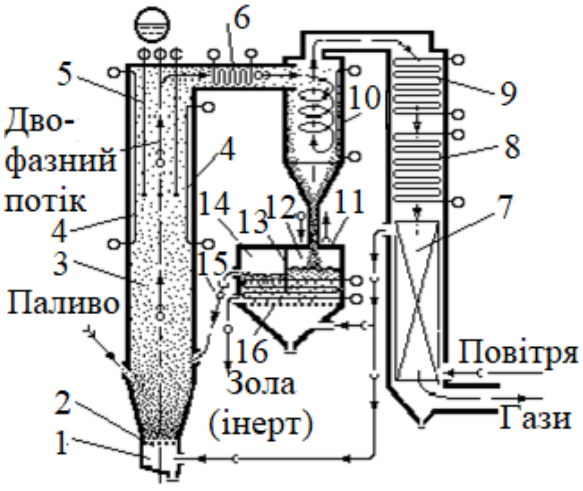
Технологія НТС відкриває можливість спалювати натуральне паливо різних видів і сортів при низькій температурі топкового середовища, до 1100°С, при якій вихід оксидів азоту (NO_x) малий, тому їх концентрація у викиді нижче гранично допустимої.

Недоліком даної технології є можливість збільшення хімічного та механічного недопалу палива при порушеннях режиму функціонування топки. За низьким рівнем викиду NO_x ця технологія є унікальною.



1 – дуттьова камера,
2 – повітророзподільні грати,
3 – КШ, 4 – дверцята,
5 – топковий радіаційний екран,
6 – топкова камера,
7 – поверхня нагріву, занурена в КШ

Рис. 5. Схема топки котла із бульбашковим КШ



1 – дуттьова камера;
2 – повітророзподільні грати;
3 – топкова камера;
4 – топочні радіаційні екрани;
5 – ширми; 6, 7 – пароперегрівач;
8 – економайзер; 9 – повітропідігрівач;
10 – циклон; 11 – винесений теплообмінник;
12 – вхідна камера; 13 – переділ;
14 – камера вихідна; 15 – течка;
16 – повітророзподільні грати теплообмінника

Рис. 6. Схема котла з циркулюючим киплячим шаром

Технологія спалювання під підвищеним тиском

Технологія СПТ приваблює можливістю зменшити габарити Кт, скоротити питому витрату конструкційних матеріалів. Вона ще не освоєна при спалюванні твердого палива.

З розглянутих котельно-топкових технологій у нинішніх умовах для енергетики України великий інтерес становлять перші три.

Особливий інтерес представляє поєднання зазначених перспективних технологій в одній КТС.

При цьому вдається зберегти, використати переваги кожної з них і одночасно скоротити ступінь прояву властивих їм недоліків.

Технологіям ООТ + КС + НТС властива універсальність за умов доцільного застосування, а саме, за видом і сортом палива, за одиничною тепловою потужністю Кт, а також за призначенням: їх можна успішно застосовувати як основу програми А (оновлення котлів застарілого, традиційного типу) і як основу програми Б (створення нових перспективних КТС четвертого покоління).

Деякі завдання розробки зазначеної комплексної технології стали предметом наукових досліджень з цієї теми.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз існуючих перспективних котельно-топкових технологій спалювання твердого палива та деяких результатів проведеного дослідження закономірностей технологічного процесу у котлах, зокрема, із киплячим шаром.

Виклад основного матеріалу. Виконані дослідження були спрямовані на вивчення закономірностей технологічного процесу в Кт з КШ, зокрема, однієї з важливих, але недостатньо досліджених з них, – процесу зовнішньої ерозії (ЗЕ), тобто витончення занурених у КШ поверхонь нагрівання Кт, що стикаються з речовиною інерту, оскільки саме ЗЕ визначає ресурс найактивніших поверхонь нагрівання Кт.

Інтенсивність процесу ЗЕ визначається дією численних факторів. Основними серед них є розмір частинок інерту, форма частинок інерту, швидкість псевдозрідження, місцезнаходження труби по висоті КШ, відносна відстань труби від осьової вертикальної поздовжньої площини топки, діаметр труби, кут атаки поверхні труби потоком частинок, ерозійна стійкість матеріалу труби, ерозійна агресивність частинок інерту.

ЗЕ в КШ є неминучою, оскільки неминучою є силова взаємодія частинок інерту з поверхнею труб, занурених у шар. Виключити ЗЕ не можна, можна лише обмежити її інтенсивність.

Тому на шляху широкого впровадження технології КШ у станційну та промислову енергетику виникло завдання обмеження інтенсивності процесу ЗЕ (I_g, *мм/рік* або *кг/(м²·рік)*), яка за несприятливих умов функціонування Кт з БКС може досягати 5–10 мм/рік, а в Кт з ЦКС – 50–100 мм/рік.

Завдань, пов'язаних з обмеженням ЗЕ багато, оскільки процес ЗЕ характеризується високою розмірністю. Завдання утворюють складний комплекс тісно взаємозалежних елементів. Це надає задачі управління цим процесом проблемного характеру.

Для вирішення цієї проблеми необхідно вирішити щонайменше три головні науково-технічні задачі (рис. 7):

А) задача підвищення ерозійної стійкості елементів Кт;

Б) задача зниження ерозійної агресивності інерту;

В) задача підтримки щадного режиму функціонування Кт.

Отримано головні закономірності впливу на інтенсивність ЗЕ з боку основних конструктивно-компонувальних та режимних факторів. Отримані результати дозволили запропонувати та розробити концепцію управління процесом ЗЕ у Кт з КШ [18] на основі вирішення зазначених трьох задач. Кожна з них має комплексний характер. Усі вони утворюють відносно складну систему елементів з численними причинно-наслідковими зв'язками.

Повнота розв'язання окремих задач визначає ступінь розв'язання сформованих ними основних задач, і навіть досягнутий рівень технологічної ефективності функціонування Кт з КС у конкретних виробничих умовах.

В табл. 1–3 наведено шляхи розв'язання розглянутих задач.

Одним із запропонованих перспективних засобів управління інтенсивністю ЗЕ є розроблене оригінальне рішення задачі Б.

Воно полягає у застосуванні в Кт з КШ інертної сипучої речовини КШ (матеріалу КШ – інерту), який містить певну частку спеціально підготовленої засипки з частинок низької ерозійної агресивності (ЕА) порівняно з агресивністю частинок золи твердого палива, що спалюється.

Одним із шляхів вирішення зазначеної задачі є зниження ЕА частинок інерту шляхом їх обкатки, тобто притуплення виступаючих над їх

Рис. 7. Проблема обмеження інтенсивності зовнішньої ерозії і формуючі її задачі

Таблиця 1

Задача А. Шляхи підвищення ерозійної стійкості елементів Кт

Засіб підвищення ерозійної стійкості елементів Кт	Примітки
Конструкція елементів	
А1. Використання ерозійно-стійкого конструкційного матеріалу	Відносно дорого
А2. Застосування труб, плакованих ерозійно стійким матеріалом	Дорого
А3. Застосування труб із зміцненим поверхневим шаром	Високоефективно
А4. Застосування труб із потовщеною стінкою	Просто, недорого
А5. Застосування труб із захисним покриттям	Важко, відносно дорого
А6. Застосування труб із захисними накладками	Малоефективно
А7. Застосування змійовиків із різних за властивостями трубчастих елементів	Високоефективно, відносно дорого
А8. Застосування змійовикових пакетів, що допускають встановлення у двох позиціях	Високоефективно
А9. Застосування дешевих пакетів обмеженої довговічності, що легко замінюються	Необхідна індивідуаль-на оцінка ефективності
Компоновка елементів	
А10. Доцільне розташування труб у пакеті за відмітками їх рядів	Необхідна оптимизація рішення
А11. Доцільне розташування труб у пакеті по відносним крокам	Необхідна оптимизація рішення
А12. Доцільне розташування труб у пакеті по куту до горизонту	Необхідна оптимизація рішення

Таблиця 2

Завдання Б. Шляхи зниження ерозійної агресивності частинок інерту

Засіб зниження ерозійної агресивності частинок інерту	Примітки
Б1. Застосування інерту з часток, попередньо обкатаних	Зручно на газі та мазуті
Б2. Рециркуляція інерту між топкою та установкою для обкатки частинок	Зручно на газі та мазуті
Б3. Робота з використанням інерту з великих частинок	Ускладнює експлуатацію
Б4. Використання стороннього інерту з частинок із низькою ерозійною агресивністю	Зручно на газі та мазуті

Таблиця 3

Завдання В. Шляхи підтримки щадного режиму функціонування Кт

Засіб підтримки щадного режиму функціонування Кт	Примітки
В1. Робота при високій порізності КС	Речовина частинок інерту малої щільності
В2. Використання палива з низькою ерозійною агресивністю частинок золи	Див. таблицю 2
В3. Використання засобів зниження ерозійної агресивності інерту	Див. таблицю 2
В4. Поточний контроль над станом труб для того, щоб використовувати весь їх ресурс	Доступно, не складно
В5. Застосування САР з алгоритмами, що забезпечують оптимальні траєкторії перехідних процесів	Доступно

поверхнею гострих вершин і ребер. Для такого впливу на частинки інерту, можна використовувати природний процес внутрішньої ерозії в КШ або процес обкатки частинок на стороні, у спеціальній установці (рис. 8). Отриманий в ній обкатаний інерт (ОІ) можна застосовувати в одній або декількох КТС.

Поглиблений аналіз стану вітчизняної енергетики, структури її паливно-енергетичного балансу показує, що планомірне цілеспрямоване повернення її (насамперед станційної її частини) до використання твердого палива як основного джерела енергії є доцільним шляхом розвитку, оскільки веде до досягнення високого ступеня енергонезалежності та енергобезпеки держави. Ця обставина свідчить про суттєву соціальну значущість розглянутого напрямку розвитку КТС.

Висновки. Актуальність спалювання вугілля в Україні обумовлена безліччю факторів, починаючи від історичного контексту та закінчуючи соціальними та економічними аспектами.

Важливо знаходити оптимальний баланс між потребами в енергозабезпеченні та дотриманням екологічних норм.

Перехід до чистих джерел енергії потребує комплексного підходу та довгострокового планування, щоб забезпечити стабільне та стійке майбутнє для України.

Ринок твердопаливних Кт на деревині, агровідходах та біопаливі демонструє зростання та динамічний розвиток у відповідь на сучасні виклики та потреби споживачів.

Діюче обладнання котельнь потребує оновлення та розвитку на основі застосування нових високоефективних котельно-топкових технологій.

Необхідний розвиток структури паливно-енергетичного балансу енергетики з урахуванням збільшення частки енергетичного твердого палива.

Підвищення технологічної ефективності КТС можливе як шляхом оновлення існуючого обладнання, так і шляхом створення та використання нового досконалого обладнання.

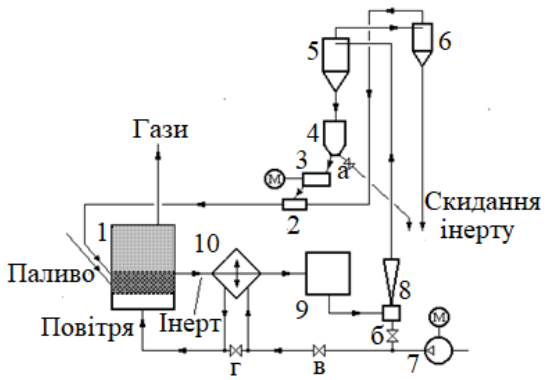
Розвиток парку котлів у вітчизняній енергетиці слід здійснювати на основі використання прогресивних, перспективних (особливо пріоритетних) котельно-топкових технологій.

Перспективними котельно-топковими технологіями є технології використання об'ємно-охолоджуваної топки, киплячого шару, низькотемпературного спалювання та спалювання під підвищеним тиском.

Поєднання перших трьох технологій є найбільш доцільним, пріоритетним для випадків спалювання палива всіх видів і сортів. Технологія спалювання під підвищеним тиском доцільна при використанні газового та рідкого палива.

Істотним результатом вивчення технологічного процесу котлів з КС стала розробка концепції управління процесом зовнішньої ерозії.

Виконані розробки дозволили запропонувати шляхи та засоби підвищення технологічної ефективності котлів з КС під час роботи на низькоякісному твердому паливі, у тому числі суттєво підвищити стійкість поверхонь нагріву до впливу зовнішньої ерозії.



1 – котел; 2 – змішувач;
3 – живильник ОІ; 4 – бункер ОІ;
5 – віддільник ОІ;
6 – віддільник дрібного інерту;
7 – вентилятор дуттьовий;
8 – ежектор; 9 – вузол обкатки;
10 – охолоджувач інерту;
а, б, в, г – запірно-регулюючий орган

Рис. 8. Схема котла із системою приготування та рециркуляції ОІ

Список літератури:

1. Тенденції ринку твердопаливних котлів: сучасні виклики та перспективи, 11 червня 2024. URL: https://surl.li/nqqbsz (дата звернення: 04.05.2025).
2. Твердопаливні котли «Zubr» / Офіційний сайт ТОВ «ZUBR». URL: https://kotel-zubr.com/catalog/promyslovi-kotly (дата звернення: 04.05.2025).
3. Твердопаливні котли «Вітязь» та «Гетьман» / Офіційний сайт машинобудівного заводу «Вітязь». URL: https://kotel.vitiaz.biz/ (дата звернення: 04.05.2025).
4. Парогенератори промислові «Ідмар» / Офіційний сайт ТОВ «НВП Електротепломаш». URL: https://prompar.com/uk/about (дата звернення: 04.05.2025).
5. Базеєв Є.Т. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє – Кн. 3: Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики / Є.Т. Базеєв, Б.Д. Білека, Є.П. Васильєв та ін. Київ : Фенікс, 2013. 399 с.
6. Воінов О.П., Воінова С.О. Технічна геронтологія в проблемі підвищення технологічної ефективності енергетичного обладнання. Вісник інженерної академії України. 2001. № 3. С. 174–177.
7. Воінов О.П., Елькін Ю.Г. Про зниження шкідливого впливу котельних установок на природне середовище. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2023. № 1–2 (13–14). С. 66–71. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.01.11.
8. Елькін Ю.Г., Воінов О.П. Про підвищення екологічної ефективності парку котельних установок у сучасних умовах. Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2024. № 1. С. 53–59. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.01.07.
9. Енергетичний профіль України / EES EAEC. Світова енергетика. URL: (https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-ukrainy (дата звернення: 04.05.2025).
10. Воінов О.П. Розробка науково-технічних основ створення промислових котлів з об'ємно-охолоджувальною топкою: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.01. Харків, 1986. 40 с.
11. Топка з кип'ячим шаром: пат. 11884 Україна: МПК (2006) F23C 10/00. № 4642048; заявл. 27.01.1989; опубл. 25.12.1996, Бюл. № 4. 4 с.
12. Топка кип'ячого шару: пат. 11883 Україна: МПК (2006) F23C 10/00. № 4345022; заявл. 18.12.1987; опубл. 25.12.1996, Бюл. № 4. 4 с.
13. Мисак Й.С., Гнатишин Я.М., Івасик Я.Ф. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив. Львів: Львівська політехніка, 2002. 135 с.
14. Степанов Д.В., Корженко Є.С., Боднар Л.А. Котельні установки промислових підприємств. Вінниця: ВНТУ, 2011. 120 с.
15. Воінов О.П., Воінова С.О. Об'ємне охолодження топки – інноваційний елемент розвитку котельно-топкових систем. Енергетика та електрифікація. 2014. № 7. С. 14–17.
16. Воінов О.П., Воінова С.О. Особливості завдання управління котлами низькотемпературного бульбашкового киплячого шару. Наукові праці ОНАХТ. 2009. Вип. 35. Т. 2. Одеса: ОНАХТ. 2009. С. 236–238.
17. Воінов О.П., Чернявський О.Є. Зовнішня ерозія в котлах з циркулюючим киплячим шаром. Вивчення процесу. Управління ефективним енерговикористанням: матеріали 5-ої міжнар. наук.-практ. конф. (Одеса, 4–5 вересня 2003 р.). Одеса: ОНПУ, 2003. С. 85–87.
18. Воінов О.П., Богаченко Д.І., Шевчук Є.О. та ін. Завдання обмеження зовнішньої ерозії у проблемі освоєння котлів з киплячим шаром. Управління енерговикористанням: матер. наук.-техн. конф. (Київ, 15 вересня 2002 р.). Київ: ХПІ, 2002. С. 551–554.

Voinov O.P., Elkin Yu.H. PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF BOILER-FURNACE TECHNOLOGIES

The purpose of the article is to analyze existing promising boiler-fired technologies for burning solid fuels and the results of the study of the technological process in fluidized bed boilers. The relevance of coal combustion in Ukraine and its determining factors are considered, starting from the historical context and ending with social and economic aspects. The emphasis is on the need to find the optimal balance between energy supply needs and compliance with environmental standards. The transition to clean energy sources requires an integrated approach and long-term planning. The market for solid fuel boilers running on wood, agricultural waste and biofuels is demonstrating growth and dynamic development. The current equipment of boiler plants needs to be updated and developed based on the use of highly efficient boiler-fired technologies. It is necessary to develop the structure of the fuel and energy balance of the energy sector, taking into account the increase in the share of energy solid fuels. Increasing the technological efficiency of boiler-fired systems is possible both by updating existing equipment and by creating new advanced equipment. The development of the boiler fleet in the domestic energy sector should be carried out on the basis of the use of progressive, promising boiler and furnace technologies. Such progressive technologies are the technologies of using a volume-cooled furnace,

a fluidized bed, low-temperature combustion and combustion under increased pressure. The combination of the first three technologies is the most appropriate, priority for cases of combustion of fuel of all types and grades. The technology of combustion under increased pressure is appropriate when using gas and liquid fuel. A significant result of studying the technological process of fluidized bed boilers was the development of a concept for controlling the external erosion process. The research conducted allowed us to propose ways and means of increasing the technological efficiency of fluidized bed boilers when operating on low-quality solid fuel, including significantly increasing the resistance of heating surfaces to the effects of external erosion.

Key words: *boiler and furnace technologies, solid fuel, coal, biomass, environmental friendliness, volumetric cooling of the furnace, fluidized bed, low-temperature combustion, external erosion.*

УДК 621.311
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/18

Гарист А.В.
Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА МОДУЛІВ

Розвиток технологій сонячних панелей бере свій початок у середині XIX століття, коли було відкрито фотоелектричний ефект – ключовий принцип, на якому базуються сучасні сонячні батареї. Однак реальне впровадження цієї технології відбулося лише у XX столітті, коли з'явилися перші кремнієві сонячні елементи. На той час їхня ефективність становила лише близько 6%, проте саме ці розробки стали фундаментом для подальшого прогресу в галузі.

Сьогодні виробництво сонячних панелей невпинно вдосконалюється. Дослідники та інженери працюють над підвищенням ефективності цих пристроїв, прагнучи отримати більше енергії з кожного квадратного метра панелі. Окрім цього, ведуться активні розробки щодо поліпшення їхньої роботи за різних умов освітлення й температур, а також збільшення стійкості до впливу навколишнього середовища.

У статті розглянуто сучасні технології виготовлення сонячних панелей, інноваційні матеріали для сонячних панелей, методи покращення ефективності сонячних панелей, а також вплив автоматизації та роботизації для оптимізації виробничих процесів.

В статті визначено класичні методи виготовлення сонячних панелей, такі як використання монокристалічного та полікристалічного кремнію, а також інноваційні тонкоплівкові технології, які дозволяють значно знизити вартість виробництва. Описано нові підходи до виготовлення панелей з використанням органічних матеріалів та перовскітних елементів, що обіцяють значне підвищення ефективності та зниження вартості сонячної енергії.

Сучасні досягнення у виробництві сонячних панелей базуються на кількох ключових аспектах: впровадженні передових методів виготовлення, автоматизації та цифровізації виробничих процесів, а також розвитку екологічно чистих технологій та рециркуляції матеріалів.

Еволюція сонячних панелей – це безперервний пошук оптимального поєднання ефективності та доступності. Від перших експериментальних моделей до передових високотехнологічних рішень кожен новий етап розвитку наближає нас до більш екологічного та економічно вигідного використання сонячної енергії.

Ключові слова: *монокристалічний кремній, полікристалічний кремній, кремнієва пластина, перовскіт, сонячна панель, акумулятор, нефуллереновий акцептор.*

Постановка проблеми. Сонячні панелі забезпечують значні екологічні переваги та довгострокову економію коштів, але їх недоліки включають високі первісні ціни, переривчасте вироблення енергії залежно від погодних умов та потенційні екологічні проблеми під час виробництва та утилізації, а також необхідність достатнього місця для встановлення, що робить їх менш життєздатними у густонаселених районах або місцях з обмеженим простором.

Вирішення цих проблем за допомогою вдосконалення технологій та заходів регулювання матиме вирішальне значення для збільшення переваг сонячної енергії та одночасного обмеження її негативних наслідків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні розробки в галузі органічних напівпровідників викликали значний ажіотаж у науковому співтоваристві та промисловості, зокрема завдяки досягненням у використанні нефуллеренових акцепторів (НФА). Ці матеріали стали справжнім проривом у виробництві органічних сонячних елементів, оскільки їх ефективність наблизилась до 20%, що значно скоротило розрив між органічними сонячними елементами і традиційними кремнієвими панелями.

В основі цієї нової технології лежать органічні напівпровідники, які мають здатність ефективно поглинати світло і перетворювати його в електрику. НФА, як клас нових матеріалів, показали значно кращі характеристики порівняно з іншими органічними напівпровідниками завдяки своїй хімічній структурі та електронним властивостям.

Одне з найцікавіших досягнень в дослідженні НФА зробила команда дослідників з Канзаського університету [1]. Вони з'ясували, що в певних умовах збуджені електрони в цих матеріалах можуть отримувати енергію не тільки з сонячного світла, а й з навколишнього середовища. Це означає, що НФА здатні зберігати й використовувати енергію, замість того, щоб її втрачати, що відкриває нові горизонти для підвищення ефективності органічних сонячних елементів. Це явище є результатом специфічних квантових ефектів, які відбуваються в цих матеріалах, і дослідники планують вивчити ці механізми детальніше.

Ці відкриття можуть кардинально змінити підхід до виготовлення сонячних панелей, що базуються на органічних матеріалах. Вони не тільки наближають органічні сонячні елементи до конкурентоспроможності з кремнієвими панелями, але й пропонують нові шляхи для оптимізації та зниження вартості виробництва сонячної енергії.

Завдяки таким досягненням органічні сонячні елементи можуть стати більш доступними і широко використовуватися у майбутньому, що відкриває великі перспективи для відновлюваних джерел енергії.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз нових технологій виготовлення сонячних панелей, які зможуть забезпечити суттєве підвищення ефективності та зниження витрат на виробництво сонячної енергії. Зокрема, завдання полягає у вивченні інноваційних методів виробництва, таких як використання нових матеріалів (перовскітні сонячні елементи, нефуллеренові акцептори, органічні напівпровідники) та вдосконалення технологій обробки поверхні, що дозволяють зменшити енергетичні втрати та покращити поглинання сонячного світла.

Крім того, важливо звернути увагу на розвиток автоматизованих і роботизованих систем, які здатні оптимізувати виробничі процеси і зменшити витрати на виробництво панелей, а також на методи підвищення екологічної безпеки при виготовленні сонячних панелей і зниження впливу на навколишнє середовище в процесі їх утилізації.

Таким чином, основним завданням цієї роботи є аналіз і оцінка новітніх технологічних рішень у галузі виготовлення сонячних панелей, що дозволяють значно підвищити їх ефективність, знизити витрати на виробництво та зробити сонячну енергію більш доступною для широкого використання в умовах сучасного світу.

Виклад основного матеріалу. Спершу сонячні панелі виготовляли з монокристалічного кремнію, який забезпечував високу ефективність перетворення сонячної енергії, проте його виробництво було дорогим через складність вирощування великих кристалів. З метою зниження витрат розробили технологію полікристалічного кремнію, що дозволило використовувати менші та дешевші кристали. Це стало значним проривом, оскільки зробило сонячні панелі більш доступними для широкого застосування.

Подальшим кроком у розвитку стали тонкоплівкові сонячні панелі, що створюються шляхом нанесення декількох шарів фотоактивного матеріалу на підкладку. Вони не лише мають нижчу собівартість у порівнянні з традиційними кремнієвими панелями, а й є гнучкішими, що розширює можливості їх використання. Для виготовлення таких панелей застосовують матеріали на основі кадмій-телуриду (CdTe), мідь-індій-галій-селеніду (CIGS) та аморфного кремнію. Це дозволяє інтегрувати їх у різноманітні конструкції, зокрема будівлі та транспортні засоби.

Сучасні дослідження у сфері сонячної енергетики спрямовані на розробку нових матеріалів і технологій, здатних підвищити ефективність та здешевити виробництво. Одним із найперспективніших напрямів є перовскітні сонячні елементи, які демонструють високу продуктивність при значно нижчих виробничих витратах у порівнянні з кремнієвими аналогами.

Сучасна сонячна енергетика активно розвивається, застосовуючи різні матеріали та технології для створення фотоелектричних елементів. Основні зусилля спрямовані на підвищення ефективності, зниження витрат і розширення сфер застосування сонячних панелей. Розглянемо основні технології, які використовуються при виробництві сонячних панелей.

Кремнієва технологія: монокристалічні та полікристалічні панелі

Монокристалічний кремній. Цей матеріал залишається основним у виробництві сонячних панелей завдяки високій ефективності перетворення світла – до 22–24% у комерційних моделях. Виготовлення таких панелей передбачає вирощування кремнієвих кристалів, їх нарізку на тонкі пластини та нанесення фотоелектричного шару. Завдяки високій чистоті матеріалу вони мають кращу провідність, проте їх виробництво є дорогим, що впливає на кінцеву вартість продукції.

Полікристалічний кремній. Це більш бюджетна альтернатива монокристалічним

панелям. В процесі виробництва кремній розплавляють і охолоджують, формуючи безліч дрібних кристалів, що знижує витрати. Полікристалічні панелі мають ефективність у межах 15–17%, відрізняються характерним синім відтінком і менш рівномірною текстурою.

Тонкоплівкові сонячні панелі

Кадмій-телурид (*CdTe*) *та мідь-індій-галій-селенід* (*CIGS*). Ці технології використовують надтонкі шари фотоелектричних матеріалів, нанесені на підкладку, що робить панелі легкими та гнучкими. Вони мають нижчу ефективність у порівнянні з кремнієвими аналогами (10–13% для CdTe і до 15–22% для CIGS), але їх виробництво є значно дешевшим, а можливість інтеграції в різні конструкції відкриває нові можливості застосування.

Аморфний кремній. Ще одна тонкоплівкова технологія, яка демонструє нижчу ефективність (6–8%), але добре працює в умовах слабкого освітлення. Завдяки простоті виробництва такі панелі часто використовуються в малопотужних пристроях та портативних системах.

Перовскітні сонячні елементи

Перовскітні фотоелементи – це інноваційна технологія, що пропонує високу ефективність за значно нижчих витрат виробництва. Завдяки унікальній кристалічній структурі перовскіти ефективно поглинають світло, а лабораторні дослідження вже демонструють ефективність понад 25%. Це ставить їх у один ряд із найкращими кремнієвими панелями, відкриваючи перспективи масового впровадження нових, більш доступних джерел сонячної енергії.

Органічні фотоелектричні елементи

Органічні сонячні елементи базуються на вуглецевмісних сполуках, які можуть наноситися на підкладку методом друку або іншими маловитратними технологіями. Їхні основні переваги – гнучкість, легкість і можливість створення прозорих панелей. Водночас ефективність таких елементів поки що залишається нижчою, ніж у традиційних неорганічних матеріалів, досягаючи близько 10–12%.

Гнучкі та прозорі сонячні панелі

Один із найперспективніших напрямів розвитку – створення гнучких і прозорих сонячних панелей, які можуть бути інтегровані у вікна, фасади будівель чи навіть текстиль. Такі технології відкривають нові можливості для використання сонячної енергії, роблячи її доступною майже скрізь. Хоча вони ще перебувають на ранніх етапах комерційного впровадження, їхній потенціал для широкого застосування є надзвичайно великим.

Кожен із цих напрямів сприяє подальшому розвитку сонячної енергетики, дозволяючи знайти баланс між ефективністю, вартістю та зручністю застосування. Постійні дослідження та технологічні прориви сприяють здешевленню сонячної енергії та розширенню її використання у всьому світі.

Ефективність сонячних панелей залежить від того, як добре вони поглинають світло та перетворюють його на електроенергію. Для досягнення високих показників у цій сфері розроблено ряд технологічних удосконалень:

Легування напівпровідникових матеріалів

Легування є одним із ключових процесів у створенні сонячних елементів. Введення домішок у кремній або інші напівпровідникові матеріали змінює їхні електрофізичні властивості, покращуючи ефективність збору електронів і тим самим збільшуючи вироблення енергії.

Текстурування поверхні для зменшення відбивання світла

Однією з основних проблем сонячних панелей є втрати світла через віддзеркалення від їхньої поверхні. Для мінімізації цих втрат застосовують методи мікроскопічного текстурування, які створюють спеціальні структури на поверхні кремнієвих пластин. Завдяки такому підходу відбите світло не губиться, а повторно спрямовується в матеріал, що збільшує його поглинання і, відповідно, підвищує ефективність перетворення енергії.

Пасивація задньої сторони кремнієвих пластин

Ще одним способом підвищення ефективності є пасивація задньої сторони кремнієвих елементів. Ця технологія зменшує рекомбінацію електронів і дірок, які могли б втрачатися у вигляді тепла, що дозволяє зберігати більше енергії та підвищувати продуктивність сонячних панелей.

Сучасні виробничі лінії сонячних панелей все більше залежать від автоматизації та застосування роботизованих технологій. Це дозволяє не лише підвищити швидкість і точність виробництва, а й мінімізувати людський фактор, що знижує кількість браку та покращує якість кінцевого продукту.

Автоматичне нарізування кремнієвих пластин – забезпечує рівномірність товщини і високу точність, що дозволяє ефективніше використовувати вихідний матеріал.

Нанесення провідних паст – автоматизовані методи забезпечують рівномірний розподіл електропровідних контактів, що сприяє більш ефективному збору електричного струму.

Лазерне зварювання та складання панелей – підвищує точність процесів та забезпечує надійність з'єднань між елементами панелі.

Автоматизація також дозволяє знизити собівартість виробництва, що робить сонячні панелі більш доступними для широкого застосування.

Окрім підвищення ефективності та автоматизації, важливим напрямом розвитку сонячної енергетики є зменшення негативного впливу на довкілля. Це досягається за рахунок використання екологічно безпечних матеріалів, розробки технологій рециркуляції та утилізації відпрацьованих сонячних панелей.

Дослідники працюють над зменшенням використання токсичних компонентів у виробництві сонячних панелей. Зокрема, в перовскітних сонячних елементах ведуться активні пошуки альтернатив свинцю, що дозволить зробити ці технології більш безпечними для довкілля.

Оскільки термін служби більшості сонячних панелей становить від 25 до 30 років, питання їхньої утилізації стає дедалі актуальнішим. Для вирішення цієї проблеми розробляються методи рециркуляції кремнію, скла, алюмінію та інших цінних компонентів панелей, що дозволяє значно скоротити потребу у видобутку нових ресурсів та зменшити кількість відходів.

Основні напрямки утилізації включають:

– вилучення кремнієвих пластин та їх повторне використання у виробництві нових панелей;

– переробку металевих компонентів (алюмінієві рамки, мідні дроти тощо);

– використання спеціальних методів термічної та хімічної обробки для безпечного розділення матеріалів.

Завдяки впровадженню програм рециркуляції сонячна енергетика стає більш екологічно стійкою, а повторне використання матеріалів дозволяє зменшити виробничі витрати та оптимізувати ресурсне забезпечення галузі.

Розглянемо потенційні проблеми у розвитку та використанні сонячної енергетики.

Обмежена ефективність перетворення сонячної енергії

Сучасні кремнієві сонячні панелі мають середню ефективність перетворення сонячного світла в електроенергію в межах 15–22%. Це означає, що значна частина поглинутої енергії втрачається у вигляді тепла або відбивається від поверхні панелей. Хоча дослідження у сфері перовскітів та багатошарових структур дозволяють досягти ефективності понад 40%, такі технології ще не є масово доступними через високу вартість виробництва.

Ще однією проблемою є деградація сонячних панелей з часом. Внаслідок впливу ультрафіолетового випромінювання, перепадів температур і механічних навантажень ефективність панелей поступово знижується. Стандартний термін служби фотоелектричних модулів становить 25–30 років, після чого їхня продуктивність значно падає.

Проблема накопичення енергії

Оскільки сонячні панелі генерують електроенергію лише у світлу пору доби, а її кількість залежить від погодних умов, виникає потреба в ефективних системах зберігання енергії.

На сьогодні найбільш поширеними рішеннями є літій-іонні акумулятори, які використовуються як у приватних домашніх установках, так і у великих енергетичних системах. Проте вони мають ряд обмежень:

– висока вартість виробництва та обмежений ресурс циклів заряду-розряду;

– дефіцит сировини для їх виготовлення, зокрема літію та кобальту, що може обмежувати їх доступність у майбутньому;

– екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією старих батарей.

Альтернативними рішеннями є використання гідроакумулюючих станцій, водневих технологій та натрій-іонних акумуляторів, проте ці рішення поки що перебувають у стадії розвитку та не можуть конкурувати з традиційними батареями за ефективністю та економічністю.

Потреба в розвитку інфраструктури

Для ефективного використання сонячної енергії потрібні значні інвестиції в модернізацію енергосистеми. Основні виклики включають:

– розширення мереж передачі електроенергії для інтеграції розподілених сонячних станцій;

– впровадження «розумних» мереж (smart grids), які зможуть ефективно балансувати виробництво і споживання електроенергії;

– збільшення пропускної здатності існуючих електромереж, щоб уникнути перевантажень у періоди пікового виробництва.

Високі початкові витрати

Незважаючи на зниження вартості сонячних панелей упродовж останніх десятиліть, їх встановлення все ще вимагає значних початкових інвестицій.

Основні витрати включають:

– закупівлю та монтаж обладнання (панелі, інвертори, системи кріплення);

– витрати на акумуляторні системи (якщо необхідне накопичення енергії);

– витрати на обслуговування та страхування.

У регіонах, де немає урядових субсидій або програм підтримки, ці витрати можуть стати серйозною перешкодою для масового впровадження сонячної енергетики.

Використання токсичних матеріалів у виробництві

Деякі типи сонячних панелей, зокрема тонкоплівкові, містять токсичні речовини, такі як кадмій і свинець. Вони можуть спричинити забруднення ґрунтів і водних ресурсів у разі неправильної утилізації.

Розв'язанням цієї проблеми є розробка нових, екологічно безпечних матеріалів. Наприклад, перовскітні сонячні елементи без свинцю вже активно досліджуються, хоча вони ще не досягли достатньої стабільності для комерційного використання.

Проблема утилізації відпрацьованих сонячних панелей

Оскільки сонячна енергетика стрімко розвивається, вже у найближчі десятиліття очікується значне збільшення кількості відпрацьованих панелей, які потрібно буде переробляти. На сьогодні лише 10–20% матеріалів з панелей підлягають переробці, тоді як решта часто потрапляє на сміттєзвалища.

Висновки. Сучасні досягнення в галузі сонячної енергетики відображають значний прогрес, досягнутий завдяки інноваціям у матеріалах, виробничих технологіях та методах інтеграції. Ці інновації не тільки підвищують ефективність та знижують вартість сонячних панелей, але й відкривають нові можливості для їх застосування, сприяючи поширенню відновлюваної енергії та розвитку.

В останні роки ми стали свідками значних інновацій, таких як розробка перовскітні сонячних елементів, які обіцяють високу ефективність за низької вартості виробництва. Тонкоплівкові та органічні фотоелектричні технології пропонують гнучкість та нові можливості для інтеграції сонячних панелей у повсякденне життя, включаючи будівництво, транспорт та одяг. Автоматизація та роботизація виробничих процесів сприяють зниженню витрат та збільшенню масштабів виробництва, роблячи сонячну енергію ще більш доступною.

Перспективи розвитку технологій сонячних панелей видаються безмежними. У найближчому майбутньому ми можемо очікувати подальшого підвищення ефективності сонячних панелей, зниження їхньої вартості та розширення областей застосування.

Інтеграція сонячної енергетики з іншими формами відновлюваної енергії та технологіями зберігання енергії сприятиме розвитку надійних та стійких енергосистем, здатних забезпечити потреби суспільства без шкоди для навколишнього середовища. Впровадження інтелектуальних мереж і адаптивних систем управління дозволить більш ефективно використовувати сонячну енергію, адаптуючись до умов і потреб споживачів.

Список літератури:

1. Albert Fong, "Project Development in the Solar Industry", Taylor & Francis, 2012. 250 p.
2. "Silicon days over? Organic solar panel turns 20% of sunlight into electricity", 2024. URL: https://interestingengineering.com/energy/organic-solar-panel-could-replace-silicon (дата звернення: 02.04.2025).
3. Rabindra Kumar Satpathy, Venkateswarlu Pamuru, "Solar PV Power: Design, Manufacturing and Applications from Sand to Systems", Academic Press, 2020. 520 p.
4. Ahmed Riyaz, Atif Iqbal, Hasmat Malik, Kouzou Abdellah, Sertac Bayhan, "Renewable Power for Sustainable Growth. Proceedings of International Conference on Renewal Power (ICRP 2020)", Springer Nature Singapore, 2020. 805 p.
5. Ahmed Riyaz, Atif Iqbal, Hasmat Malik, Kouzou Abdellah, Sertac Bayhan, "Renewable Power for Sustainable Growth. Proceedings of International Conference on Renewal Power (ICRP 2022)", Springer Nature Singapore, 2022. 805 p.
6. Jerzy Leszczynski, Juganta K. Roy, Supratik Kar, "Development of Solar Cells. Theory and Experiment", Springer International Publishing, 2021. 235 p.

Haryst A.V. NEW TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING SOLAR PANELS AND MODULES

The development of solar panel technology dates back to the mid-19th century, when the photovoltaic effect was discovered – the key principle on which modern solar cells are based. However, the real implementation of this technology took place only in the 20th century, when the first silicon solar cells appeared. At that time, their efficiency was only about 6%, but these developments became the foundation for further progress in the industry.

Today, the production of solar panels is constantly being improved. Researchers and engineers are working to increase the efficiency of these devices, striving to get more energy from each square meter of the panel. In addition, active developments are underway to improve their operation under different lighting and temperature conditions, as well as increase resistance to environmental influences.

The article reviews modern technologies for manufacturing solar panels, innovative materials for solar panels, methods for improving the efficiency of solar panels, as well as the impact of automation and robotics on optimizing production processes.

The article identifies classical methods for manufacturing solar panels, such as the use of monocrystalline and polycrystalline silicon, as well as innovative thin-film technologies that allow for a significant reduction in production costs. New approaches to manufacturing panels using organic materials and perovskite elements are described, which promise a significant increase in efficiency and a reduction in the cost of solar energy.

Modern achievements in the production of solar panels are based on several key aspects: the introduction of advanced manufacturing methods, automation and digitalization of production processes, as well as the development of environmentally friendly technologies and recycling of materials.

The evolution of solar panels is a continuous search for the optimal combination of efficiency and affordability. From the first experimental models to advanced high-tech solutions, each new stage of development brings us closer to a more environmentally friendly and economically beneficial use of solar energy.

Key words: *monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, silicon wafer, perovskite, solar panel, battery, non-fullerene acceptor.*

УДК 536.423
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/19

Дубовкіна І.О.
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Мирончук А.О.
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

ЗАСТОСУВАННЯ ЗНАКОЗМІННИХ ІМПУЛЬСІВ ТИСКУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГІДРОПОННОГО ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН

У зв'язку зі зростанням потреби в ефективному використанні водних ресурсів у сільському господарстві, питання підвищення врожайності у гідропонних системах набуває особливої актуальності. Дослідження присвячене впровадженню інноваційного методу оброблення живильних розчинів знакозмінними імпульсами тиску, що дозволяє оптимізувати процеси тепломасообміну та покращити фізико-хімічні властивості середовищ для вирощування рослин.

У дослідженні використано роторно-пульсаційний апарат для одержання живильних розчинів при різних параметрах тиску, частоти та часу оброблення. Проведено тестування росту рослин пшениці сорту «Альбіна» та овес сорту «Чернігівський 28» в умовах закритого ґрунту, а також дослідження для аналізу мікрофлори середовища до та після оброблення шляхом оптичної мікроскопії. В роботі використані статистичні методи обробки даних з визначенням середніх значень і стандартного відхилення.

У результаті проведених досліджень встановлено, що застосування знакозмінних імпульсів тиску при обробленні живильних розчинів сприяє суттєвому покращенню агробіологічних показників. Висота рослин збільшується на 20,5–22,7%, що свідчить про активацію ростових процесів. Врожайність підвищується на 32,8–34%, що вказує на підвищення ефективності використання поживних речовин. Спостерігається також зростання маси рослинного мату та підвищення коефіцієнта росту, що характеризує загальне посилення біомасоутворення. Біологічний аналіз підтверджує формування сприятливої мікрофлори у середовищі після оброблення, що створює здорове мікробіологічне середовище для розвитку культур. Технологія демонструє потенціал до зменшення витрат води та мінеральних добрив, що є важливим чинником сталого та ресурсозберігаючого агровиробництва.

Практична цінність дослідження полягає в розробці ефективного методу інтенсифікації вирощування культур в умовах закритого ґрунту із застосуванням гідропонного методу вирощування, що сприяє підвищенню врожайності та продовольчій безпеці.

Ключові слова: *гідропоніка, знакозмінні імпульси тиску, роторно-пульсаційний апарат, живильний розчин, врожайність, тепломасообмін, мікрофлора, продуктивність рослин.*

Постановка проблеми. У світовому сільському господарстві зростає інтерес до гідропоніки як ефективної альтернативи традиційному землеробству, що дозволяє вирощувати культури в умовах обмежених природних ресурсів, зокрема води та родючих ґрунтів. Успішне впровадження гідропонних систем залежить передусім від якості та стабільності живильного середовища, яке має забезпечувати рослини усіма необхідними макро- і мікроелементами. При цьому традиційні методи оброблення живильних розчинів не завжди забезпечують рівномірний розподіл компонентів, достатню біологічну активність середовища та оптимальні умови для кореневої системи.

У сучасних дослідженнях доведено, що фізичні методи впливу на рідинні середовища можуть змінювати їхні фізико-хімічні характеристики та сприяти інтенсифікації масопереносних процесів. Зокрема, метод знакозмінних імпульсів тиску поєднує низку гідродинамічних ефектів (кавітація, зсув, імпульсне прискорення), які можуть бути використані для покращення структури живильних розчинів. Проте на сьогодні недостатньо досліджено вплив такого підходу на агробіологічні показники рослин у гідропонних умовах, що зумовлює потребу у проведенні цілеспрямованих наукових досліджень.

Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є розроблення та експериментальна перевірка ефективного методу оброблення живильних розчинів, який би сприяв підвищенню продуктивності рослин, покращенню їх

морфометричних характеристик та формуванню сприятливого мікробного середовища при вирощуванні у гідропонних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У контексті зростаючої актуальності проблеми ефективного вирощування рослин у гідропонних умовах, наукова спільнота зосереджує увагу на вдосконаленні складу живильних розчинів, створенні автоматизованих систем керування агротехнічними параметрами та пошуку енергоефективних технологій обробки середовища вирощування. У цьому напрямі проведено низку ґрунтовних досліджень як в Україні, так і за її межами.

Зокрема, у роботі Кумар В. та ін. відзначається тенденція глобального поширення гідропоніки як відповіддю на виклики змін клімату, нестачу води та родючих ґрунтів. Автори підкреслюють важливість створення простих у використанні, автоматизованих гідропонних систем із низькими експлуатаційними витратами, що здатні функціонувати з мінімальним втручанням людини [7, с. 291].

У публікації Реджесер Г. розглядаються можливості впровадження смарт-технологій, таких як сенсорні мережі, штучний інтелект і автоматизоване керування у гідропонному виробництві. Такі підходи забезпечують підвищення точності моніторингу параметрів живильного середовища, а також дають змогу мінімізувати втрати води й добрив [8, с. 925].

Окрему увагу слід звернути на дослідження Хашізуме Т, Такакі К., які аналізують вплив імпульсних електричних полів та часомодульованої плазми на ріст рослин і мікробіологічну активність, що дає підстави припустити, що подібні фізичні методи, зокрема й знакозмінні імпульси тиску, можуть мати істотний ефект у гідропонних умовах [6, с. 59].

У роботі Ванг С., Рагван В. доведено, що біологічна модифікація середовища (додавання компосту, збагаченого бактеріями Bacillus safensis) позитивно впливає на ріст салату, покращуючи структуру мікробіоти. Це вказує на ключову роль мікрофлори у створенні стабільного середовища вирощування [11].

Також важливим є соціально-економічний аспект гідропоніки, розкритий у публікації Рамос М. Автори досліджують бар'єри впровадження цифрових гідропонних систем в міських агроініціативах та наголошують на необхідності адаптації технологій до потреб локальних спільнот [9].

Хоча наявні дослідження висвітлюють широкий спектр підходів до оптимізації гідропонних систем, залишається низка невирішених аспектів, зокрема: відсутність достатньо досліджених фізичних методів обробки живильних розчинів, що мають вплив на фізико-хімічні властивості середовища на мікро- та нанорівнях, недостатньо вивчені гідродинамічні ефекти в гідропоніці, зокрема дія знакозмінних імпульсів тиску, обмеженість досліджень щодо мікробіологічної стабільності середовищ після обробки фізичними методами, брак експериментів, які поєднують енергофізичний вплив із біологічними наслідками для культур у гідропонних умовах.

Таким чином, проведене дослідження заповнює важливу прогалину в науковій літературі, запропонувавши новий підхід до підвищення ефективності гідропонного вирощування на основі дії знакозмінних імпульсів тиску, що, в свою чергу, створює основу для подальших міждисциплінарних розробок на перетині агрофізики, мікробіології та автоматизації.

Постановка завдання. Метою статті є оцінка ефективність застосування знакозмінних імпульсів тиску в гідропонних умовах та їх вплив на зростання та продуктивність рослин. Завдання дослідження полягає у проведенні експериментального оброблення живильних розчинів знакозмінними імпульсами тиску та дослідження впливу оброблених розчинів на зростання та врожайність вибраних культур.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилося з метою оцінки впливу знакозмінних імпульсів тиску на властивості живильних розчинів та ефективність гідропонного вирощування сільськогосподарських культур. Методологія базувалася на застосуванні роторно-пульсаційного апарату (РПА), що створював знакозмінні імпульси тиску в рідкому середовищі. Об'єктами дослідження були живильні розчини та рослини пшениці сорту «Альбіна» і овес сорту «Чернігівський 28».

У дослідженні обрано культури пшениці сорту «Альбіна» та вівса «Чернігівський 28» з огляду на їхню поширеність і чутливість до змін у живильному середовищі. Використовувалися три типи розчинів: дистильована вода, вода для крапельного зрошення та мінералізований живильний розчин.

Обробку рідин здійснювали у роторно-пульсаційному апараті за такими параметрами: тривалість 5–600 с, частота імпульсів 1–5 Гц, кутова швидкість 300–315 $с^{-1}$, тиск 370–390 кПа [3, с. 43].

Рослини вирощували в лабораторній гідропонній установці при температурі 21–23 °С, освітленні 800–1000 лк/м², з аерозольним поливом кожні 6–10 хвилин. Спостереження тривали 5–8 днів. Проводили вимірювання висоти рослин, маси мату, врожайності та коефіцієнта росту.

Для мікробіологічного аналізу використовували оптичну мікроскопію (Carl Zeiss Axio Imager Vario II, збільшення ×640), визначаючи видовий склад і чисельність мікроорганізмів до і після вирощування. Обробку даних здійснювали у Microsoft Excel 2010 з розрахунком середніх значень і стандартного відхилення, що дозволило встановити статистичну достовірність результатів [10, с. 171].

Експериментальні дослідження проводилися на дослідній установці, зображеній на рис. 1 [4, с. 45].

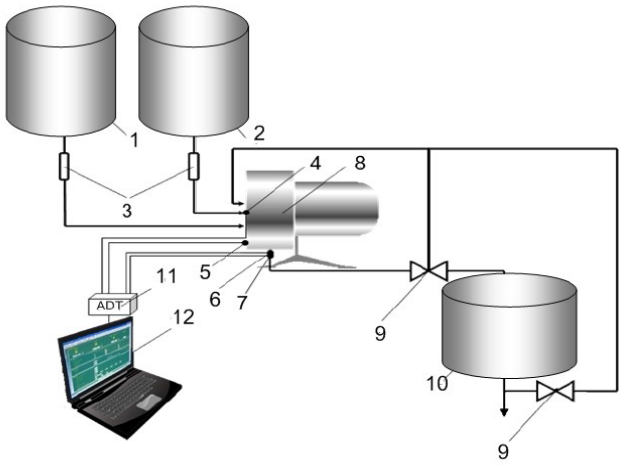


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – бак для рідини; 2 – бак для поживних речовин; 3 – витратомір; 4, 6 – датчики температури; 5, 7 – датчики тиску; 8 – роторно-пульсаційний апарат (РПА); 9 – вентиль; 10 – бак для обробленого розчину; 11 – аналогово-цифровий перетворювач; 12 – персональний комп'ютер

Основним елементом експериментальної установки є роторно-пульсаційний апарат (8), який виступає об'єктом дослідження. У цьому апараті здійснюється оброблення рідких розчинів та живильних середовищ знакозмінними імпульсами тиску, що створюються завдяки гідродинамічним ефектам: швидкостям зсуву потоку, напруженням зсуву, кутовим швидкостям обертання, миттєвій зміні тиску.

Вихідна рідина (водні розчини, середовища) надходить у бак 1, а поживні речовини – у бак 2. Через витратоміри 3 компоненти подаються до робочої камери РПА 8, де відбувається їх миттєве змішування під дією знакозмінних імпульсів тиску. Обробка може здійснюватися у двох режимах: безперервний режим – однократне проходження через камеру; режим рециркуляції – з повторною подачею суміші до камери для інтенсивнішої обробки.

Оброблені розчини надходять у бак 10 через вентиль 9. Під час дослідження фіксуються параметри температури (датчики 4 і 6), тиску (датчики 5 і 7), а також інші показники, що реєструються аналогово-цифровим перетворювачем 11 і передаються на ПК 12 [2, с. 35].

Результати дослідження засвідчили суттєвий вплив знакозмінних імпульсів тиску на агрономічні показники вирощування пшениці сорту «Альбіна» та овес сорту «Чернігівський 28» у гідропонних умовах. У середньому, висота рослин після обробки поживного розчину зросла на 21,6%, продуктивність на 33,1%, маса мату на 34,4%, а коефіцієнт росту – на 21,3% порівняно з контрольними показниками (табл. 1).

Отримані дані засвідчують зростання продуктивності при оптимізації складу поживних розчинів, зміна фізико-хімічних параметрів середовища позитивно впливає на морфологічні показники рослин (рис. 2).

Таблиця 1

Вплив знакозмінних імпульсів тиску на продуктивність рослин у гідропонній системі

Культура	Параметр	Контроль	Обробка імпульсами	Зміна, %
Пшениця	Висота рослин, см	15,9 ± 0,3	18,7 ± 0,4	+17,6
	Продуктивність, кг/м²	13,4 ± 0,5	17,8 ± 0,6	+32,8
	Маса мату, кг	26,6 ± 0,7	35,6 ± 0,8	+33,8
	Коефіцієнт росту	4,4 ± 0,2	5,3 ± 0,2	+20,5
Овес	Висота рослин, см	16,1 ± 0,3	18,8 ± 0,4	+16,8
	Продуктивність, кг/м²	13,5 ± 0,5	18,0 ± 0,6	+33,3
	Маса мату, кг	40,1 ± 0,8	54,0 ± 1,0	+34,7
	Коефіцієнт росту	4,5 ± 0,2	5,4 ± 0,2	+20,0

Примітки: значення представлені як середнє ± стандартне відхилення (n=3); відсоток зміни розрахований відносно контрольного значення.

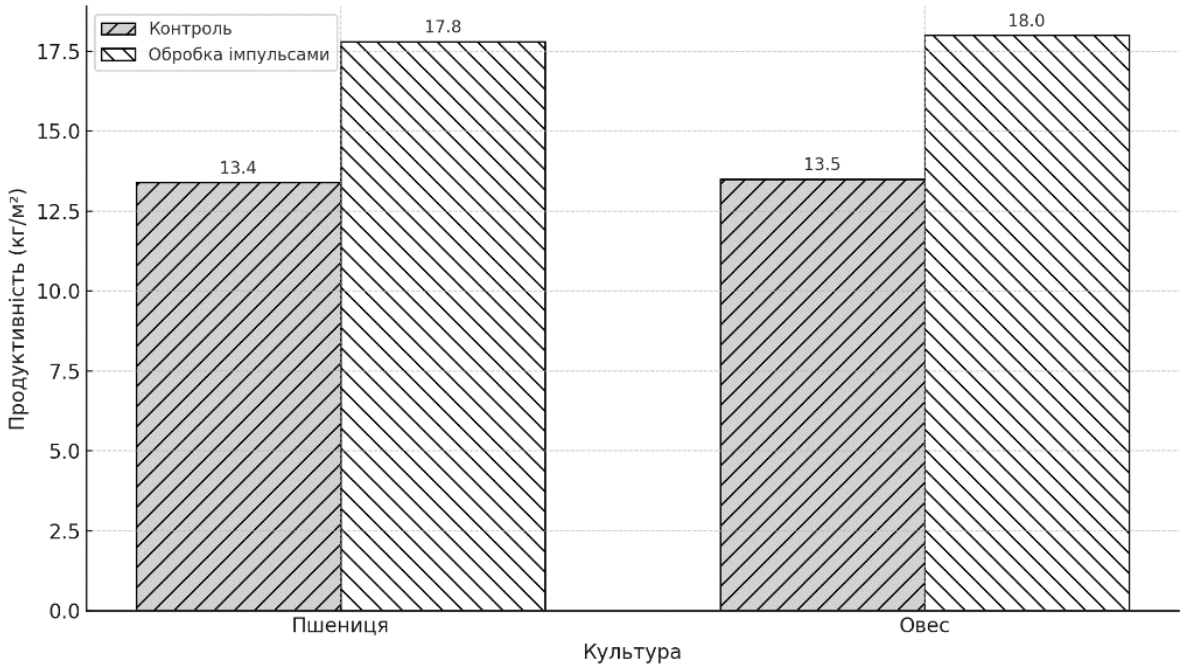


Рис. 2. Вплив знакозмінних імпульсів тиску на продуктивність рослин

Мікробіологічний аналіз показав формування сприятливої мікрофлори у розчинах після обробки. Виявлено такі домінантні види: Хлорела Звичайна (*Chlorella vulgaris*), Хламідомонада Рейнхарда (*Chlamydomonas reinhardtii*), Амеба Протей (*Amoeba proteus*), Євглена Грициліс (*Euglena gracilis*), що свідчить про біологічну стабільність середовища (табл. 2).

Отже, застосування знакозмінних імпульсів тиску сприяє інтенсифікації процесів засвоєння поживних речовин, що, у свою чергу, забезпечує підвищення врожайності на 32,8–34%. Запропонований метод дає змогу модифікувати фізико-хімічні властивості живильних розчинів на мікро- та нанорівнях, що позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. Біологічний аналіз підтверджує формування стабільної мікрофлори в розчинах, що відкриває перспективи їх повторного використання в умовах гідропонного вирощування [5, с. 344].

Таким чином, технологія знакозмінних імпульсів тиску є перспективним інструментом для аграрного та харчового секторів, що забезпечує зростання продуктивності за одночасного раціонального використання ресурсів.

На першому етапі вирощування зеленого гідропонного корму мінеральне живлення кореневої системи не застосовувалося. Теоретичне обґрунтування базується на тому, що протягом перших 5–12 діб ендосперм насінини забезпечує зародок і проросток поживними речовинами. У цей період відбувається спочатку гетеротрофне, а потім – автотрофне живлення за рахунок фотосинтезу [1, с. 981].

Ефективність обробки живильних середовищ знакозмінними імпульсами тиску залежить від параметрів оброблення. Встановлені оптимальні параметри: тривалість – 15–30 с, частота – 1–5 разів, кутова швидкість – 300–315 $с^{-1}$, імпульси тиску – 370–390 кПа.

Результати експериментальних досліджень, які демонструють вплив знакозмінних імпульсів тиску на ріст і продуктивність рослин у гідропонних системах, включаючи показники висоти рослин, продуктивності, середньої маси одного мату та темпу росту для різних варіантів

Таблиця 2

Біологічний склад живильних розчинів до та після культивування рослин

Поживний розчин	До вирощування	Після вирощування
Дистильована вода	Мікроорганізми відсутні	*Chlorella vulgaris* (після вирощування пшениці), *Amoeba proteus* (після вирорщування овесу)
Вода для зрошення	Поодинокі мікроорганізми	*Chlamydomonas reinhardtii*, *Euglena gracilis*
Розчин із добривами	Наявні мікроорганізми	*Cyanobacteria* (*Anabaena* spp., *Nostoc* spp.)

оброблення рідких живильних розчинів, які використовуються для вирощування культур, подано в табл. 3.

Аналіз експериментальних даних показав, що застосування знакозмінних імпульсів тиску для оброблення рідких живильних розчинів та середовища в гідропонних системах призвело до збільшення продуктивності пшениці «Альбіна» на 34% та продуктивності вівса «Чернігівський 28» на 33,8%. Крім того, приріст пшениці підвищився на 21,7%, а для вівса – на 22,2%. Найвища продуктивність була досягнута при використанні живильного розчину з добривами.

Найвищий приріст був зафіксований при використанні зрошувальної води для систем крапельного зрошення, що відповідає вимогам до кислотності води з агрономічними та екологічними критеріями. Оброблення рідкого живильного розчину в гідропоніці із застосуванням знакозмінних імпульсів тиску викликає структурні трансформації на мікро- та нанорівнях, в результаті чого змінюються фізико-хімічні параметри розчину, а також інтенсифікуються масопереносні та гідромеханічні процеси між макро- та мікроелементами й водою, що покращує їх засвоєння рослинами та прискорює їх ріст.

Висновки. В результаті досліджень було встановлено позитивний вплив знакозмінних імпульсів тиску на морфометричні показники та продуктивність зернових культур, зокрема пшениці та вівса. Оброблення гідродинамічним впливом сприяло підвищенню висоти рослин, маси мату, коефіцієнта росту та, найголовніше, продуктивності. Так, у порівнянні з контролем, продуктивність зросла на 32,8% для пшениці та на 33,3% для вівса. Отримані результати свідчать про доцільність застосування технології імпульсного впливу в агровиробництві з метою підвищення урожайності.

Запропоновані результати можуть стати основою для подальших міждисциплінарних досліджень із залученням інженерії, мікробіології та агрохімії. Пропонується розглядати можливість автоматизації контролю параметрів оброблення для промислових гідропонних систем.

Подальші дослідження доцільно зосередити на визначенні оптимальних параметрів імпульсів тиску, частоти та тривалості впливу для різних видів сільськогосподарських культур. Крім того, актуальним є вивчення економічної ефективності впровадження даної технології в умовах промислового землеробства.

Таблиця 3

Вплив знакозмінних імпульсів тиску на показники врожайності зеленої маси пшениці «Альбіна» та овес «Чернігівська 28», одержаних гідропонним способом

Параметр	Середовище	Пшениця сорту «Альбіна»		Овес сорту «Чернігівський 28»	
		Контроль	Обробка	Контроль	Обробка
Висота рослин, 10^{-2} м	Дист. вода	15.9±0.01	18.7±0.02	16.1±0.01	18.8±0.01
	Вода для зрошення	16.1±0.02	18.9±0.02	16.5±0.01	19.1±0.01
	Розчин з добривами	16.1±0.02	18.9±0.02	16.5±0.01	19.1±0.01
Урожайність, кг/м²	Дист. вода	13.4±0.02	17.8±0.02	13.5±0.02	18.0±0.02
	Вода для зрошення	13.5±0.02	18.0±0.03	13.7±0.02	18.3±0.02
	Розчин з добривами	13.5±0.02	18.1±0.02	13.6±0.02	18.2±0.02
Середня маса мату, кг	Дист. вода	26.6±0.02	35.6±0.04	40.1±0.02	54.0±0.005
	Вода для зрошення	27.0±0.01	36.0±0.02	41.1±0.01	54.9±0.02
	Розчин з добривами	27.0±0.02	36.5±0.04	41.0±0.02	54.9±0.005
Коефіцієнт приросту, ум. од.	Дист. вода	4.4	5.3	4.5	5.4
	Вода для зрошення	4.5	5.5	4.5	5.6
	Розчин з добривами	4.5	5.5	4.6	5.6

Список літератури:

1. Abinandan S., Subashchandrabose S. R., Venkateswarlu K. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019. № 39 (8). P. 981–998. DOI: 10.1080/07388551.2019.1654972

2. Acevedo E., Silva P., Silva H. Wheat growth and physiology. *Plant Production and Protection*, 2002. № 30. P. 35–36.

3. Dubovkina I. Innovative Technology Of Water Treatment In Recirculating Aquaculture-hydroponic System. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади*

її конкурентоздатності: Матеріали VI Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 12 вересня 2017 р., м. Київ. К. НУХТ, 2017. С. 43–44.

4. Dubovkina I. Change of physical and chemical parameters of the liquid binary systems by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*, 2017. № 6 (1). P. 142–154. DOI: 10.24263/2304-974X-2017-6-1-16

5. Dubovkina I., Davydenko B., Rikhter V. Modelling of the hydrodynamic conditions throughout liquid system treatment by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal,* 2019. № 8 (2). P. 343–354. DOI: 10.24263/2304-974X-2019-8-2-13

6. Hashizume T., Takaki K. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2021. № 5 (1). P. 59. DOI: 10.1007/s41614-021-00059-9

7. Kumar R., Rathore S., Kundlas K., Rattan S. Vertical farming and organic farming integration: a review. *Organic Farming: Global Perspectives and Methods* (*Woodhead Publishing Series in Food Science*), 2023. P. 291–315. DOI: 10.1016/B978-0-323-99145-2.00002-1

8. Kumar A., Singh J. Trends in Hydroponics Practice/Technology in Horticultural Crops: a review. *International Journal of Plant & Soil Science,* 2023. № 35 (2). P. 57–65. DOI: 10.9734/ijpss/2023/v35i22759.

9. Rajaseger G., Chan K. L., Tan K. Y., Ramasamy S., Khin M. C. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*, 2023. № 19 (9). P. 925–938. DOI: 10.6026/97320630019925

10. Ramos M. Innovations in hydroponic systems for urban agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 2002. № 7 (1). DOI: 10.1002/uar2.20012&#8203

11. Shurchkova J., Dubovkina I. Research parameters of the water-ethanol mixture obtained under conditions of alternating impulses of pressure. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2015. № 46 (1155). P. 171–176.

12. Wang S., Raghavan V. Hydroponic farming – A state of art for the future agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 2022. № 366. P. 132855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132855

Dubovkina I.O., Myronchuk A.O. APPLICATION OF ALTERNATING IMPULSES OF PRESSURE FOR INTENSIFICATION OF HYDROPONIC

In light of the growing need for efficient use of water resources in agriculture, the issue of increasing crop yields in hydroponic systems is gaining particular relevance. This study is dedicated to the implementation of an innovative method of treating nutrient solutions with alternating pressure pulses, which enables the optimization of heat and mass transfer processes and improves the physicochemical properties of media used for plant cultivation.

A rotor-pulsation apparatus was used in the study to prepare nutrient solutions under varying parameters of pressure, pulse frequency, and treatment duration. Experimental testing was conducted on the growth of wheat plants of the "Albina" variety and oats of the "Chernihivskyi 28" variety under closed soil conditions. Microbiological analysis of the medium before and after treatment was performed using optical microscopy. Statistical methods were applied for data analysis, including the calculation of mean values and standard deviation.

The research results revealed that the use of alternating pressure pulses for the treatment of nutrient solutions significantly enhances agrobiological indicators. Plant height increased by 20.5–22.7%, indicating accelerated growth processes. Yield improved by 32.8–34%, demonstrating more efficient nutrient utilization. Additionally, an increase in plant mat mass and a higher growth coefficient were observed, reflecting greater biomass production. Biological analysis confirmed the development of beneficial microflora in the medium after treatment, contributing to a healthier microbial environment for plant growth. The technology shows potential for reducing water and fertilizer consumption, which is a key aspect of sustainable and resource-efficient agricultural production.

The practical value of the research lies in the development of an effective method for intensifying crop cultivation under closed soil conditions using hydroponic techniques, which contributes to increased yields and food security.

Key words: *hydroponics, alternating pressure pulses, rotor-pulsation apparatus, nutrient solution, yield, heat and mass transfer, microflora, plant productivity.*

УДК 621.383.51:621.311.243:697.91
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/20

Жуков Р.О.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Петрик О.А.
Національний університет «Запорізька політехніка»

СОНЯЧНІ ТРЕКЕРИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті здійснено комплексний огляд сучасних систем відстеження сонця, які активно впроваджуються для підвищення ефективності сонячних електростанцій, особливо в умовах обмеженого простору. Розглянуто ключові типи трекерів, серед яких одновісні сонячні трекери, що забезпечують рух панелей у межах однієї площини, та двохосні сонячні трекери, які дозволяють точно орієнтувати фотоелектричні модулі на Сонце у двох координатах. У межах класифікації одновісних конструкцій проаналізовано горизонтальні одновісні трекери (HSAT), вертикальні одновісні трекери (VSAT), азимутальні трекери та трекери з похилою віссю, кожен із яких має власні переваги залежно від географічного розташування та архітектурних умов об'єкта. Особлива увага приділена порівнянню активних сонячних трекерів, що використовують електроприводи та контролери для позиціонування, з пасивними сонячними трекерами, які функціонують на основі термогідравлічного балансу або біметалевих елементів.

Наведено аналітичні дані щодо впливу трекерів на продуктивність сонячних панелей, зокрема в сценаріях обмеженої території, де правильне орієнтування модулів має вирішальне значення для зменшення затінення та втрат. Розглянуто технології стеження за сонцем, що інтегруються з сучасними інформаційними системами керування, дозволяючи оптимізувати роботу електростанцій у режимі реального часу. Окреслено переваги впровадження системи трекінгу на різних рівнях: від автономних малих СЕС до масштабних комерційних сонячних електростанцій. Обґрунтовано доцільність використання трекерів в умовах щільної міської забудови, дахових СЕС і агрофотовольтаїки.

Окремо проаналізовано технічні виклики, пов'язані з інтеграцією з сонячними електростанціями, зокрема потребу в адаптації кріплень, вітростійкості та енергоспоживанні самих трекерів. Зроблено висновок, що системи відстеження сонця є ключовим елементом сучасних технологій у сфері сонячної енергетики, що дозволяють не лише збільшити вихід енергії, але й забезпечити гнучкість у проєктуванні ефективних енергетичних рішень для складних умов просторового розміщення.

Ключові слова: *одновісні сонячні трекери, двохосні сонячні трекери, активні сонячні трекери, пасивні сонячні трекери, горизонтальні одновісні трекери (HSAT), вертикальні одновісні трекери (VSAT), азимутальні трекери, трекери з похилою віссю, системи відстеження сонця, підвищення ефективності.*

Постановка проблеми. Підвищення ефективності сонячних електростанцій у сучасних умовах урбанізації, дефіциту вільних земельних ресурсів та зростаючого попиту на децентралізовану генерацію енергії з відновлюваних джерел вимагає впровадження інноваційних рішень, зокрема систем стеження за сонцем. Одним із найперспективніших напрямів є застосування одновісних і двохосних сонячних трекерів, здатних динамічно змінювати орієнтацію фотомодулів відповідно до положення Сонця, тим самим забезпечуючи максимальне поглинання сонячного випромінювання протягом дня. Проте ефективне використання таких систем у щільних забудовах, дахових СЕС або інших просторово обмежених середовищах супроводжується рядом технічних і проєктних обмежень.

Зокрема, горизонтальні одновісні трекери (HSAT) та вертикальні одновісні трекери (VSAT), які демонструють високу продуктивність на відкритих площах, не завжди придатні для інсталяції на дахах чи між будівельними конструкціями. Азимутальні трекери та трекери з похилою віссю частково вирішують це завдання, проте потребують додаткових розрахунків щодо вітрового навантаження, стабільності кріплень і уникнення

затінення. Окрему складність становить вибір між активними сонячними трекерами, які забезпечують високу точність позиціонування завдяки електромеханічним приводам, та пасивними сонячними трекерами, що є менш енерговитратними, але поступаються у швидкості реакції й точності налаштування.

На сьогодні відсутнє єдине уніфіковане інженерне рішення щодо оптимального типу трекера для обмежених просторів, яке б враховувало співвідношення між продуктивністю, вартістю, надійністю та можливістю інтеграції з існуючими сонячними електростанціями. Також недостатньо досліджено вплив різних конфігурацій систем відстеження сонця на загальну продуктивність установок у нестандартних просторових умовах. У цьому контексті актуальним є аналіз і систематизація сучасних технологій стеження за сонцем, що дозволяють максимально ефективно використовувати обмежені площі при впровадженні СЕС.

Таким чином, постає проблема вибору та адаптації сонячних трекерів – HSAT, VSAT, азимутальних, з похилою віссю – до умов компактного розміщення, з урахуванням технічних параметрів, економічної доцільності, потенціалу підвищення ефективності та впливу на продуктивність систем. Розв'язання цієї проблеми відкриває нові можливості для оптимізації проєктів у галузі електроенергетики, зокрема у межах реалізації локальних або комерційних сонячних електростанцій нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення ефективності сонячних електростанцій за допомогою систем стеження за сонцем дедалі частіше опиняється у фокусі наукової спільноти, зокрема у контексті обмеженого простору для встановлення фотомодулів. У численних дослідженнях розглядаються різні типи трекерів – одновісні сонячні трекери, двохосні сонячні трекери, а також специфічні їх модифікації, серед яких горизонтальні одновісні трекери (HSAT), вертикальні одновісні трекери (VSAT), азимутальні трекери та трекери з похилою віссю.

У роботі А. В. Казначеєва та ін. представлено аналіз автоматизованих технологій очищення енергомодулів для сонячних станцій автономного живлення. Хоча акцент зроблено на експлуатаційній ефективності, автори наголошують і на важливості точного орієнтування панелей для запобігання втратам енергії [1, с. 45]. О. Казіміров та ін. у своєму дослідженні орієнтування сонячних панелей у системах автономного електроживлення наводять приклади застосування одновісних систем, що є ефективним рішенням у системах із обмеженим доступним простором [2, с. 46].

Питання техніко-економічного моделювання роботи сонячних електростанцій із врахуванням змін кута нахилу панелей розкрито у праці В. В. Панченка та Р. О. Харіна, де розглядаються переваги активних сонячних трекерів у порівнянні з пасивними системами з огляду на коефіцієнт окупності та витрати енергії [3, с. 7]. У свою чергу, А. В. Бубліков та І. І. Іванський досліджують системи оптимального керування положенням фотоелектричних установок, що включають інтеграцію з сонячними електростанціями та алгоритми позиціонування за сонцем – критично важливий елемент для технології стеження за сонцем [4, с. 24].

Міжнародні дослідження також зосереджені на підвищенні ефективності систем стеження. Так, Д. Л. С. Нагасрі (D. L. S. Nagasri) та ін. вивчають можливість поєднання фотоелектричних панелей із термоелектричними генераторами, де точне відстеження сонця залишається ключовим чинником для загального коефіцієнта корисної дії [5, с. 6]. Х. У. Манзур (H. U. Manzoor) та ін. виконали моделювання оптимального кута нахилу PV-модулів, демонструючи, що навіть просте коригування кута з використанням базових трекерів дозволяє досягти суттєвого підвищення ефективності системи [6, с. 1833].

У роботі М. Альмадхачі (M. Almadhhachi) досліджено концепцію «соняшникового дерева» як альтернативи класичним трекерам у щільних урбанізованих умовах. Автори наголошують на важливості адаптації трекерів до умов обмеженого простору, особливо при встановленні СЕС на дахах або у внутрішньодворових зонах [7, с. 5]. С. Я. Хан (S. Y. Khan) та ін. подають огляд інноваційних методів керування температурою сонячних панелей, підкреслюючи, що ефективність системи прямо залежить від точності позиціонування модулів, зокрема у двохосних трекерах [8, с. 1157].

Дослідження С. А. Аскінс (S. A. Askins) та ін. присвячене мікро-CPV модулям з інтегрованими трекерами, що працюють у режимі планарного стеження. Це дослідження демонструє потенціал трекерів навіть у мініатюризованих конструкціях, де критичним є вплив трекерів на продуктивність при обмеженій площі поверхні [9, с. 2].

Нарешті, Х. Чжан (X. Zhang) та ін. описують модульний пристрій із самостійним стеженням за сонцем, що підтверджує перспективність інтеграції адаптивних трекерів у розподілені сонячні електростанції [10, с. 7].

Таким чином, проведений аналіз вітчизняних і зарубіжних публікацій свідчить про стійке зростання наукового інтересу до теми вдосконалення систем стеження за сонцем у контексті підвищення ефективності, зниження витрат та розширення можливостей їх використання в умовах обмеженого простору. Разом із тим, подальших досліджень потребують питання точного порівняння ефективності різних типів трекерів (HSAT, VSAT, азимутальних, похилих) за умов реальних просторових обмежень, а також вдосконалення алгоритмів активного та пасивного стеження для їх масштабованої інтеграції з сучасними сонячними електростанціями.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження аспектів використання сонячних трекерів для підвищення ефективності сонячних електростанцій, з акцентом на аналізі доцільності впровадження одновісних і двохосних систем (зокрема HSAT, VSAT, азимутальних трекерів і трекерів з похилою віссю) в умовах обмеженого простору. Особливу увагу приділено порівнянню активних і пасивних трекерів, їх впливу на продуктивність фотоелектричних модулів, а також можливостям інтеграції систем відстеження сонця в сучасні архітектури сонячних електростанцій.

Таким чином, у рамках даного дослідження ставились такі завдання: здійснити класифікацію сонячних трекерів за кількістю осей обертання та принципом дії; проаналізувати особливості застосування одновісних (HSAT, VSAT) і двохосних (азимутальних, похилих) систем з урахуванням просторових і кліматичних обмежень; порівняти ефективність активних і пасивних трекерів у контексті впливу на генерацію електроенергії; дослідити доцільність використання трекерів в умовах обмеженого простору, включаючи дахові або фасадні установки; а також надати техніко-економічні рекомендації щодо впровадження найбільш ефективних рішень для малих і середніх сонячних електростанцій.

Виклад основного матеріалу. У контексті глобального переходу до відновлюваних джерел енергії сонячні електростанції (СЕС) набули широкого поширення як один із найперспективніших засобів генерації екологічно чистої електроенергії. Проте ефективність роботи фотоелектричних модулів значною мірою залежить від кута падіння сонячного випромінювання, що змінюється впродовж доби й року. Саме тому важливим компонентом сучасних СЕС є системи відстеження сонця – сонячні трекери, які забезпечують динамічну орієнтацію панелей у напрямку максимального освітлення. Застосування таких систем дозволяє підвищити виробіток електроенергії в середньому на 20–40% залежно від типу трекера та регіональних умов [6, с. 1833].

Впровадження трекерів у середовищах із дефіцитом вільної площі (дахові СЕС, урбанізовані зони, території агрофотовольтаїки) є одним із головних викликів для розробників і проєктантів. Обмеження простору накладають низку вимог на вибір типу трекера, його габарити, стабільність, стійкість до вітрових навантажень та здатність уникати самозатінення. Зростання інтересу до компактних, мобільних і адаптивних трекерів спричинене не лише тенденцією до децентралізації генерації, а й потребою максимально ефективного використання кожного квадратного метра площі для розміщення фотоелементів [7, с. 5; 10, с. 7]. У зв'язку з цим значну увагу приділяють розробці трекерів із покращеними параметрами інтеграції в складні просторові структури.

Сонячні трекери поділяються на кілька основних типів залежно від кількості ступенів свободи, способу руху та геометрії встановлення. Найбільш поширеними є одновісні трекери, які змінюють положення фотоелектричних панелей відносно однієї осі. Серед них розрізняють горизонтальні одновісні трекери (HSAT), які обертають модулі навколо горизонтальної осі з півночі на південь, та вертикальні одновісні трекери (VSAT), що здійснюють обертання за східно-західною орієнтацією. Ці системи вважаються оптимальними за співвідношенням ціна–ефективність, особливо в умовах обмеженого простору, оскільки дозволяють щільніше розташовувати ряди модулів без значного затінення [2, с. 46; 4, с. 24]. Двохосні трекери забезпечують точніше орієнтування панелей на Сонце, однак потребують більше місця та є дорожчими в реалізації. За принципом дії трекери поділяють на активні та пасивні. Активні трекери використовують електроприводи або гідравлічні системи для зміни положення, тоді як пасивні працюють без зовнішнього джерела енергії – наприклад, за рахунок теплового розширення рідини або зміни тиску, що спрощує конструкцію і зменшує

витрати на обслуговування, хоча й знижує точність наведення. Саме трекери в умовах обмеженого простору потребують особливо зваженого підходу до вибору між активними й пасивними системами, адже від цього залежить не лише щільність розміщення модулів, а й стабільність генерації електроенергії.

Двохосні трекери забезпечують найвищий рівень точності стеження за Сонцем, оскільки обертають панель одночасно у двох площинах – горизонтальній та вертикальній. Такі системи демонструють найвищу продуктивність, зокрема у великих відкритих локаціях із високим рівнем інсоляції [5, с. 6]. Однак через складність конструкції, значну вартість та великі габарити вони рідко використовуються в умовах міської забудови чи на дахах, де кожен сантиметр має значення.

Існують також азимутальні трекери, які обертаються навколо вертикальної осі, орієнтуючи модуль за напрямком Сонця на горизонті, а також трекери з похилою віссю, які поєднують функціональність одновісних рішень з можливістю нахилу на визначений кут до горизонту. Останні добре зарекомендували себе в регіонах із нерівномірною поверхнею та при встановленні на дахах, де неможливо забезпечити ідеальну горизонтальність. Їх застосування дозволяє досягти компромісу між технічною простотою та енергетичним прибутком [6, с. 1833]. Для систематизації основних конструктивних і функціональних відмінностей між різними типами сонячних трекерів, а також визначення їх доцільності у використанні в умовах обмеженого простору, у таблиці 1 подано узагальнення ключових характеристик. Порівняння охоплює кількість осей обертання, спосіб керування (активний або пасивний), придатність до встановлення на обмежених площах, рівень енергетичної ефективності та типові витрати на обслуговування. Такий підхід дозволяє обґрунтовано підійти до вибору системи відстеження сонця залежно від технічних і просторових умов конкретного проєкту сонячної електростанції.

Сонячні трекери класифікують не лише за кількістю осей, а й за принципом дії – на активні та пасивні системи. Активні сонячні трекери працюють за допомогою електроприводів, моторизованих механізмів і контролерів, що постійно коригують положення фотоелектричних модулів на основі інформації від сенсорів освітленості, або за попередньо запрограмованою траєкторією руху Сонця. Такі системи характеризуються високою точністю стеження та гнучкістю у налаштуваннях, що дозволяє досягти максимального рівня виробітку електроенергії протягом світлового дня [4, с. 25].

Пасивні сонячні трекери, на відміну від активних, не потребують джерел живлення для керування орієнтацією. Їхня робота ґрунтується на фізичних принципах – зазвичай тепловому розширенні рідини, газу або біметалевих елементів, які реагують на різницю в освітленості або температурі з обох боків конструкції. Наприклад, при нагріванні однієї сторони елемент розширюється й нахиляє панель у напрямку більш інтенсивного сонячного випромінювання. Такі системи є менш точними, проте простими в обслуговуванні, дешевшими й придатними до автономної експлуатації у віддалених місцях без доступу до електромереж [1, с. 46].

У контексті сонячних електростанцій малої площі, що функціонують у щільно забудованих районах або на дахах будівель, обидва типи трекерів мають свої переваги й обмеження. Активні трекери забезпечують вищу генерацію

Таблиця 1

Порівняльна характеристика типів сонячних трекерів

Тип трекера	Кількість осей	Спосіб керування	Придатність до обмеженого простору	Рівень ефективності	Вартість обслуговування
Горизонтальний одновісний (HSAT)	1	Активний/пасивний	Середня	Високий (до +25%)	Помірна
Вертикальний одновісний (VSAT)	1	Активний	Висока	Високий (до +20%)	Низька
Азимутальний	1	Активний	Висока	Середній (до +15%)	Низька
Трекер з похилою віссю	1	Активний/пасивний	Висока	Середній (до +18%)	Помірна
Двохосний	2	Активний	Низька	Максимальний (до +40%)	Висока

електроенергії, але потребують додаткового енергоспоживання та займають більше простору для повноцінного руху. Натомість пасивні трекери можуть бути корисні у проєктах із суворими просторовими обмеженнями, де ключовим є мінімізація технічної складності та надійність за відсутності обслуговування [7, с. 5; 10, с. 7]. Вибір між цими двома системами має базуватись на ретельному балансі між продуктивністю, доступною площею, умовами експлуатації та довгостроковою економічною ефективністю.

Одним із ключових аргументів на користь впровадження сонячних трекерів є їхній безпосередній вплив на рівень генерації електроенергії. Завдяки динамічному стеженню за Сонцем системи трекінгу здатні значно зменшити втрати, пов'язані з неідеальним кутом падіння сонячного світла на поверхню панелі. Особливо відчутною є перевага трекерів у місцях зі значними добовими та сезонними коливаннями інсоляції. Наприклад, за даними Nagasri D. L. S. та ін., використання двохосьових трекерів дозволяє збільшити виробіток енергії до 35–40% у порівнянні зі стаціонарними конструкціями [5, с. 6], тоді як HSAT і VSAT дають приріст на рівні 15–25% залежно від розташування об'єкта [6, с. 1835].

У міських умовах та на дахах будівель ефективність трекерів обмежується простором і затіненням від навколишньої інфраструктури. У таких випадках найбільш доцільним є застосування вертикальних одновісних або азимутальних трекерів, які забезпечують оптимізацію руху при збереженні компактності системи. Як зазначають Almadhhachi M. та співавт., у густонаселених середовищах найкращий результат показують інтелектуальні трекери з обмеженим діапазоном повороту, адаптовані до специфіки середовища [7, с. 7].

Особливої уваги заслуговує застосування трекерів в агрофотовольтаїці, де розміщення панелей повинне враховувати не лише інсоляцію, а й потреби рослинництва. У таких системах часто використовуються трекери з похилою віссю, що дозволяють коригувати положення панелі залежно від фаз росту рослин, зменшуючи затінення ґрунту в критичні періоди. За даними Zhang X. та ін., використання адаптивних модульних систем стеження дозволяє не лише підвищити продуктивність СЕС на 20%, а й зберегти стабільні умови для агровиробництва [10, с. 14]. Рис. 1 ілюструє, як конструктивні параметри та орієнтація панелей у різних типах трекерів впливають на результативність генерації енергії залежно від умов використання. Зокрема, системи з максимальною свободою руху демонструють вищі показники ефективності, але вимагають більше простору, що обмежує їхнє застосування в умовах щільної забудови.

Успішна інтеграція сонячних трекерів у сучасні архітектури сонячних електростанцій (СЕС) передбачає врахування як технічних можливостей обраної системи, так і обмежень навколишнього простору. Залежно від масштабів СЕС, доступної площі, орієнтації ділянки та кліматичних умов, обираються відповідні трекери,

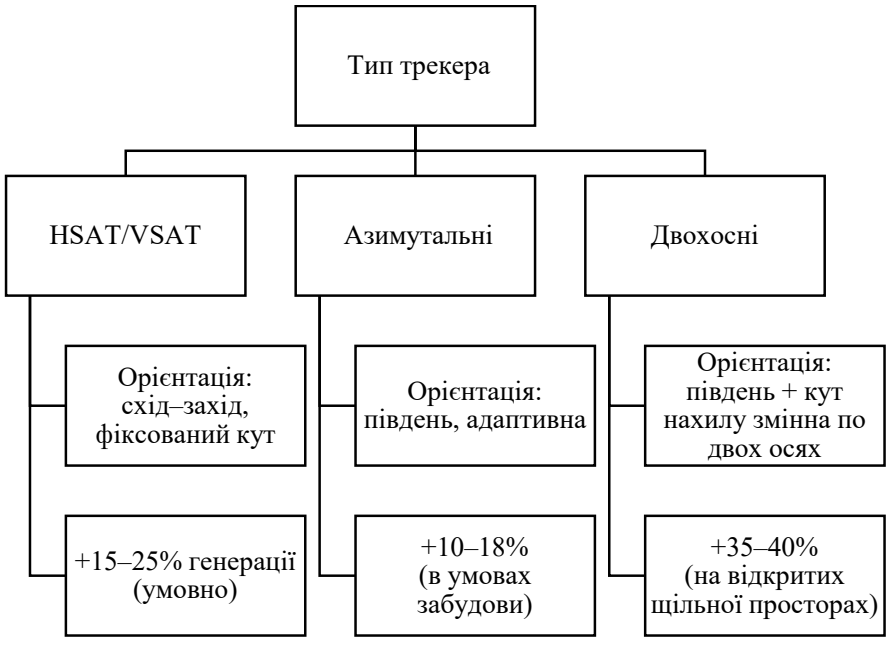


Рис. 1. Взаємозв'язок типу трекера, орієнтації та рівня генерації енергії

які можуть ефективно взаємодіяти з системами моніторингу, акумулювання енергії та керування потужністю. Наприклад, у малих і середніх СЕС на дахах промислових або житлових будівель пріоритет надається вертикальним одновісним трекерам або азимутальним системам, що можуть бути встановлені без порушення статичної рівноваги об'єкта [6, с. 1834]. У великих наземних установках частіше використовують горизонтальні або двохосні трекери, особливо коли мова йде про генерацію в мегаватному діапазоні [5, с. 6].

Ключовим елементом функціонування трекерів у сучасних СЕС є алгоритми автоматичного стеження за Сонцем, які ґрунтуються на геолокаційних параметрах, астрономічних таблицях або даних сенсорів освітлення. Системи керування в активних трекерах здатні не лише визначати оптимальне положення панелі протягом дня, а й адаптуватися до хмарності, затінення або змін погодних умов. Автоматизовані модулі керування, інтегровані з контролерами заряду, значно підвищують стабільність роботи автономних електроживильних комплексів [2, с. 47].

Разом із тим, інтеграція трекерів у СЕС в умовах обмеженого простору стикається з низкою практичних викликів. По-перше, це – необхідність забезпечення вільної зони обертання, яка в умовах щільної міської забудови або нерівного рельєфу може бути критично обмеженою. По-друге, особливу увагу потрібно приділяти питанням вітростійкості, адже рухомі конструкції трекерів є більш вразливими до вітрових навантажень, особливо на висоті. По-третє, ускладнюється захист від затінення між рядами, що вимагає точного проєктування інтервалів та висоти розміщення. В урбанізованому середовищі навіть незначні похибки в конфігурації можуть звести нанівець переваги трекінгу [7, с. 7]. Тому оптимальна інтеграція трекерів потребує застосування цифрового моделювання, інсоляційного аналізу та погодинної симуляції генерації.

У контексті швидкого розвитку сонячної енергетики зростає потреба у вдосконаленні систем трекінгу, особливо з огляду на обмеження простору, енергоспоживання та адаптації до змінних умов середовища. Одним із ключових напрямів є розробка інтелектуальних адаптивних трекерів, які поєднують сенсорне управління з алгоритмами машинного навчання для прогнозування траєкторій Сонця з урахуванням метеоумов, сезонних коливань і навіть локальних затінень. Такі системи здатні автоматично коригувати роботу панелей не лише за освітленістю, а й за коефіцієнтом продуктивності в реальному часі.

Окремий напрям розробки – це мобільні та модульні рішення, що призначені для обмежених або нестабільних середовищ, зокрема дахів, мобільних енергокомплексів і агрофотовольтаїки. Мобільні трекери характеризуються малою вагою, спрощеною механікою та здатністю до швидкого демонтажу, що важливо в умовах тимчасових інсталяцій або для аварійного енергозабезпечення. Модульні трекери дозволяють гнучко масштабувати систему в залежності від конфігурації об'єкта, зберігаючи ефективність генерації навіть за складного просторового планування [7, с. 8].

Ще один перспективний вектор розвитку стосується інновацій у сфері енергоефективності та структурної мобільності трекерів. Вчені й інженери працюють над зниженням власного енергоспоживання трекерів, використанням надлегких матеріалів, розумними приводами з мінімальною інерцією та системами балансування, що зменшують навантаження на опори. Деякі експериментальні системи вже демонструють здатність до енергетичної самодостатності – коли трекер споживає не більше 1% від загального добового виробітку модуля [5, с. 7]. Також активно впроваджуються механізми обмеженого діапазону обертання, які дозволяють зменшити площу впливу при незначній втраті продуктивності, що є особливо актуальним для щільної забудови.

Таким чином, розвиток технологій стеження за Сонцем спрямований на створення розумних, компактних і енергоефективних рішень, здатних працювати у складних умовах із високим рівнем адаптивності, що відкриває нові можливості для децентралізованої та міської сонячної генерації.

Висновки. У даному дослідженні проаналізовано теоретичні засади та ключові конструктивно-функціональні параметри застосування сонячних трекерів у сучасних сонячних електростанціях, з особливою увагою до умов обмеженого простору. Встановлено, що впровадження одновісних сонячних трекерів (зокрема горизонтальних HSAT та вертикальних VSAT) є ефективним рішенням для дахових, міських та мобільних СЕС, де важливим є збереження щільності розміщення модулів без втрат продуктивності. У свою чергу, двохосні сонячні трекери демонструють найвищі показники генерації енергії, проте мають суттєві обмеження щодо просторової інтеграції та вартості обслуговування.

Зроблено порівняльний аналіз активних та пасивних сонячних трекерів. Доведено, що активні системи з електроприводами і сенсорним стеженням забезпечують вищу точність позиціонування і більший приріст енергії, тоді як пасивні трекери на основі термогідравлічних рішень є придатними для автономного застосування у віддалених або технічно спрощених установках. Важливо, що азимутальні трекери та трекери з похилою віссю демонструють добру адаптивність до нерівномірного рельєфу та складних архітектурних умов, що робить їх ефективними в агрофотовольтаїці та середовищах із нестандартними обмеженнями площі.

Показано, що системи відстеження сонця є не лише додатковим компонентом, а критично важливим елементом сучасної фотоелектричної архітектури. Перспективним напрямом є розробка технологій стеження за сонцем, що базуються на адаптивному керуванні, сенсорних зворотних зв'язках і можливості самооптимізації. Особливу цінність у цьому контексті становлять технології трекінгу в умовах обмеженого простору, які дозволяють інтегрувати трекери навіть у середовища з мінімальним доступним простором.

Підкреслено, що інтеграція з сонячними електростанціями повинна здійснюватися з урахуванням геометрії простору, параметрів затінення, вітрового навантаження та взаємної орієнтації панелей. Потреба у гнучких, енергоефективних та стійких конструкціях спонукає до активного розвитку інтелектуальних трекерів, які здатні автоматично адаптуватися до зовнішніх умов. Таким чином, вплив трекерів на продуктивність СЕС в умовах щільної забудови, мобільності або змінної топографії стає визначальним чинником їх впровадження в нових енергетичних проєктах. Перспективи розвитку галузі пов'язані з подальшим вдосконаленням алгоритмів керування, конструкцій трекерів та їхньої структурної мобільності, що у сукупності забезпечить стабільне зростання частки відновлюваної енергії в глобальному енергобалансі.

Список літератури:

1. Казначеєв А. В., Заячковський А. В., Завацький В. О., Сторчак К. П. Дослідження технології розумного очищення сонячних енергомодулів станції автономного живлення. Зв'язок. 2024. № 3. С. 43–47. https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.034347

2. Kazimirov O., Vlasov K., Onypchenko P., Kostenko I. Орієнтування сонячних панелей системи автономного електроживлення стаціонарного пункту управління. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. № 1 (63). С. 45–48. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.045

3. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. № 2. С. 3–13. https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295

4. Бубліков А. В., Іванський І. І. Синтез та дослідження системи оптимального керування положенням сонячної фотоелектричної установки. Електротехнічні та інформаційні системи. 2024. № 105. С. 23–31. https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-5

5. Nagasri D. L. S., Pathipooranam P., bin Mohd Salleh M. F., Marimuthu R. Evaluating the performance and feasibility of integrating thermoelectric generators with solar photovoltaic panels: A case study. Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 64. 105572. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105572

6. Manzoor H. U., Aaqib S. M., Manzoor T., Azeem F., Ashraf M. W., Manzoor S. Effect of Optimized Tilt Angle of PV Modules on Solar Irradiance for Residential and Commercial Buildings in Different Cities of Pakistan: Simulation-Based Study. Energy Science & Engineering. 2025. P. 1831–1845. https://doi.org/10.1002/ese3.70004

7. Almadhhachi M., Seres I., Farkas I. Sunflower solar tree vs. flat PV module: A comprehensive analysis of performance, efficiency, and land savings in urban solar integration. Results in Engineering. 2024. Vol. 21. 101742. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101742

8. Khan S. Y., Rauf S., Liu S., Chen W., Shen Y., Kumar M. Revolutionizing solar photovoltaic efficiency: A comprehensive review of cutting-edge thermal management methods for advanced and conventional solar photovoltaic. Energy & Environmental Science. 2025. P. 1130–1175. https://doi.org/10.1039/D4EE03525A

9. Askins S. A., Vallerotto G., Dominguez Dominguez C., Duchemin M., Nardin G., Ackermann M., та ін. Progress and Demonstration of Micro-CPV Module with Integrated Planar Tracking and Diffuse Light Collection. IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2022. P. 1–13. https://doi.org/10.1109/PVSC48317.2022.9938894

10. Zhang X., Li W., Wang Y., Wang Z., Sun H., Tao K., Ye T., та ін. Design and Application of Self-Power-Tracking Modular Solar Device. SSRN. 2025. P. 1–23. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5164912

Zhukov R.O., Petryk O.A. **SOLAR TRACKERS IN SPACE-CONSTRAINED CONDITIONS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF SOLAR POWER PLANTS**

The article provides a comprehensive review of modern sun-tracking systems that are actively being implemented to improve the efficiency of solar power plants, especially under space-constrained conditions. The study considers the main types of trackers, including single-axis solar trackers, which enable panel movement within a single plane, and dual-axis solar trackers, which allow precise orientation of photovoltaic modules towards the Sun along two coordinates. Within the classification of single-axis designs, horizontal single-axis trackers (*HSAT*)*, vertical single-axis trackers* (*VSAT*)*, azimuthal trackers, and tilted-axis trackers are analyzed, each offering specific advantages depending on the geographical location and architectural context of the installation. Special attention is given to the comparison between active solar trackers–powered by electric drives and controlled by automated systems–and passive solar trackers, which operate on the principles of thermohydraulic balance or bimetallic elements.*

Analytical data is presented regarding the impact of trackers on solar panel performance, particularly in spatially restricted environments, where optimal module orientation is critical to reducing shading and energy loss. The article examines solar tracking technologies integrated with modern control systems, enabling real-time optimization of power plant operation. The advantages of implementing tracking systems at various levels are outlined, ranging from autonomous small-scale PV systems to large commercial solar power stations. The feasibility of using trackers in densely built urban areas, rooftop installations, and agrivoltaic systems is substantiated.

Technical challenges associated with tracker integration into solar power plants are separately analyzed, including the need for adaptable mounting systems, wind resistance, and the energy consumption of the trackers themselves. The conclusion highlights that sun-tracking systems are a key component of current technologies in the field of solar energy, offering not only an increase in energy output but also greater flexibility in designing efficient energy solutions under complex spatial constraints.

Key words: *single-axis solar trackers, dual-axis solar trackers, active solar trackers, passive solar trackers, horizontal single-axis trackers* (*HSAT*)*, vertical single-axis trackers* (*VSAT*)*, azimuthal trackers, tilted-axis trackers, sun-tracking systems, efficiency enhancement.*

УДК 662.7
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/21

Новосад Ю.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воробйов М.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ГАЗИФІКАЦІЇ БІОМАСИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ

Заміщення природного газу на альтернативні види палива є надійним шляхом забезпечення енергетичної незалежності Держави. На ряду з широким розвитком нових технологій використання альтернативних палив, зокрема таких як пряме спалювання біомаси, для існуючого паливовикористовуючого обладнання, що спалює природний газ, найбільш простим на технологічним є переведення обладнання на спалювання альтернативного газового палива. Таким альтернативним газовим паливом може бути біогаз, звалищний газ, або генераторний газ утворений з вугілля або біомаси.

Оскільки генераторний газ можна отримувати безпосередньо на об'єкті, де встановлене конкретне паливовикористовуюче обладнання, то важливою та актуальною є оцінка складу та властивостей даного палива (генераторного газу) в залежності від складу вихідної сировини – вугілля, біомаси або відходів різного походження.

Робота присвячена визначенню складу генераторного газу в залежності від початого складу сировини, температури процесу та коефіцієнту надлишку повітря в газогенераторі. Розвинутий теоретичний підхід щодо розрахунку складу продуктів газифікації твердих палив, зокрема вугілля і біомаси, що базується на законах рівноважної термодинаміки. Представлено математичну модель визначення складу рівноважних продуктів згоряння на основі базових законів хімічної термодинаміки. Проведено аналіз основних рівнянь процесу газифікації з врахуванням впливу режимних параметрів (коефіцієнт надлишку повітря та температура процесу) на утворення продуктів газифікації. Отримані результати демонструють, що температура є ключовим фактором у визначенні складу генераторного газу: при 800–900°C і водяної пари, що свідчить про домінування реакцій окислення, тоді як при 1000–1100°C основними продуктами є CO і H_2, що підтверджує переважання реакцій відновлення. Вплив складу сировини також відіграє значну роль: деревина через високий вміст кисню продукує більше CO_2, тоді як пластик і гума через високий вміст вуглецю та водню сприяють утворенню CO та H_2.

Кореляція експериментальних і теоретичних даних підтверджує можливість прогнозування складу газової суміші на основі термодинамічного моделювання, що є важливим для проектування газифікаційних установок і визначення оптимальних умов процесу.

Ключові слова. *Заміщення природного газу, процеси газифікації палив, рівноважні продукти газифікації, біомаса, константи рівноваги хімічних реакцій.*

Постановка проблеми. Через зростання цін на традиційні паливо-енергетичні ресурси і, перш за все, внаслідок спостережуваного тренду підвищення цін на вуглеводневу сировину, передбачається, що прогресивні технології генерації теплової енергії на базі відновлювальних джерел енергії та побутових відходів мають знайти ширше застосування як у системах централізованого теплопостачання (СЦТ, близько 60% споживачів), так і в системах індивідуального теплопостачання (СІТ). При цьому є певні розбіжності в оцінках місця газифікації – від доволі скромного локального до значущого в масштабах окремих держав (на прикладі підземної газифікації вугільних басейнів, зокрема в Узбекистані, Австралії, Південній Африці). В Україні процес газифікації звичайно розглядають як використання місцевих альтернативних джерел сировини для певної місцевості [1, 2].

На сучасному етапі розвитку технологій заміщення викопних палив Актуальною та важливою є задача ефективного використання

альтернативних непроектних палив різного походження.

Для енергетичних установок які використовують у якості основного палива природній газ, для їх переведення на альтернативні палива можна використовувати різні шляхи:

– Глибока модернізація обладнання з переведенням газового обладнання на спалювання твердого палива (вихрових передтопках, у шарі та ін.);

– Заміщення природнього газу альтернативним газовим паливом отриманим в процесах газифікації твердої паливної сировини.

Для прогнозування режимів та експлуатаційних характеристик роботи обладнання при переході з природного газу на продукти газифікації необхідно мати дані з точного складу та властивостей відповідного генераторного газу. Оскільки для процесів газифікації можна використовувати багато видів альтернативних твердих палив (біомаса різного походження, автомобільні шини, пластмаса, продукти органічного походження та інше), то необхідно коректно виконувати оцінку паливного газу, який може бути одержаний з такої сировини.

Щодо визначення складу і властивостей продуктів газифікації твердих палив, то в основному викостовують експериментальні методи які полягають у прямому визначенні компонентів газифікації безпосередньо за результатами процесу. Такий спосіб є достатньо капіталоємним з точки зору часових та фінансових затрат.

Для вирішення цієї задачі в роботі пропонується використовувати методи рівноважної хімічної термодинаміки. В роботі пропонується виконати оцінку складу та властивостей продуктів газифікації шляхом визначення стану їх рівноважності використовуючи підходи хімічної термодинаміки та для розрахунку хімічних рівноваг TERRA (автор Б.Г. Трусов), яка реалізована на основі відповідних обчислювальних механізмів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [4, 5] було представлено інформацію щодо газових палив, які певною мірою можуть слугувати альтернативою природному газу в системах опалення побутових і виробничих приміщень.

Водночас тенденції, намічені новою Енергетичною стратегією України-2023 на період до 2050 р. яка включає міжнарожні зобов'язання та враховує сучасні виклики в енергетиці та побудована на зменшені частик використання вугілля в котлоагрегатах СЦТ, зокрема, стратегія акцентує увагу на розвитку біоенергетики. Планується, що до 2035 року обсяг постачання первинної енергії з біомаси, біопалива та відходів досягне 11 млн т н.е. Дана стратегія має як своїх прихильників, так і опонентів. Наприклад, у роботі [6] наведено перелік переваг і недоліків двох систем: прямого спалювання та газифікації твердого палива, включно з відходами деревообробки та рослинними відходами (лушпиння соняшника). Є вказівки на те, що попередня газифікація сировини має більше переваг і менше недоліків, ніж пряме спалювання. Газифікація при цьому дає змогу безпосередньо використовувати обладнання для спалювання природного газу в той час, як «переобладнання» на тверде паливо можна порівняти з вартістю робіт із заміни котла [6]. Продукти газифікації вугілля, твердих і рідких органічних речовин, біомаси можуть з'явитися досить цінним альтернативним газовим паливом, що заміщає природний газ у системах теплопостачання приватних і комунальних господарств.

Під час визначення складу окислювача для проведення процесу газифікації: повітря, O_2, повітря збагачене O_2, H_2O, CO_2, продукти згоряння або суміш з-поміж згаданих компонентів, під час вибору співвідношення «вихідне паливо: окислювач», а також параметрів процесу газифікації (температура, тиск) слід виходити з прагнення отримати газове паливо з максимальним вмістом горючих компонентів, які зазвичай відповідають синтез-газу ($CO + H_2$), без дисперсних включень (включень сажі С).

Передбачено стратегічне планування газифікації цієї технології в економіку з урахуванням забезпечення правових та економічних передумов просування, зокрема й через комбіновані цикли «газифікація – генерування енергії», найважливішого місця в цих процесах технології підземної газифікації вугілля, визнання ролі біомаси та біогазу.

Постановка завдання. Мета дослідження полягала в розрахункову-теоретичному прогнозуванні складу і властивостей горючих газів отриманих шляхом газифікації вихідної твердопаливної сировини використовуючи методи хімічної термодинаміки.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Метод дослідження – теоретичне визначення продуктів реакції та їх порівняння з експериментальним складом та властивостей синтез-газу, що утворюється при газифікації різних видів біомаси,

зокрема з вугілля, рослиинної олії, соломи, обробленої та необробленої деревини, трави, у процесах газифікації за умов різних параметрів (температура, тиск, тип окиснювального агента).

Об'єкт дослідження – процеси газифікації біомаси, зокрема пелетизованих відходів деревини та комбінованих пелет із стічних вод і деревини, в умовах використання різних газифікаційних установок.

Предмет дослідження – утворення генераторного газу при газифікації різних типів біомаси; вплив типу палива та параметрів процесу газифікації (температура, тиск, тип окиснювального агента) на склад і властивості генераторного газу; енергетична ефективність процесу газифікації в залежності від типу біомаси та умов її обробки.

Виклад основного матеріалу. Як буде показано нижче, дійсно, під час вибору складів вихідних реагентів і параметрів процесу газифікації виходять із запобігання утворенню твердофазних компонентів.

У роботі [7] виконано ексергетичний аналіз процесу газифікації різних біопалив, представлено склади продуктів і параметри процесу газифікації. Оцінимо склади продуктів газифікації з погляду їхньої рівноважності. З цією метою буде використано два прийоми:

1. Сувора оцінка: визначення складу рівноваги продуктів реакції для заданої органічної частини біопалива за відомих параметрів процесу (p, T) і зіставлення рівноважного і фактично отриманого складів.

2. Визначення відповідності виходу окремих компонентів (з числа фактично отриманих у дослідах) необхідним за рівновагою концентраціям з використанням табульованих констант рівноваги відповідних реакцій.

Умовою хімічної рівноваги в ізобарно-ізотермічній (p = const, T = const) системі, де міститься i j -их речовин j = 1,2,... i, з хімічним потенціалом окремої з них μ_j, є екстремальна залежність (існування мінімуму) вільної ентальпії ізобарно-ізотермічного потенціалу системи, що реагує, залежно від глибини перебігу реакції (ступінь просування реакції), функції Гіббса G [8],

$$(dG)_{P,T} = 0 \qquad (1)$$

Зазначена закономірність може бути легко отримана для індивідуального компонента

$$dG = d(H - TS) = dH - TdS - SdT \qquad (2)$$

з урахуванням співвідношення для 1-го початку термодинаміки та співвідношення між приростами (повними диференціалами) теплоти, ентальпії та внутрішньої енергії

$$dG = Vdp - SdT \qquad (3)$$

при изобарно-изотермических условиях: dp = 0; dT = 0.

Якщо поняття енергії Гіббса узагальнюють на хімічно реагуючу суміш компонент [8].

$$dG = Vdp - SdT + \Sigma\mu_i dn_i, \qquad (4)$$

то присутня хімічна реакція $\sum \nu_i A_i = 0$ в умовах ізобарно-ізотермічного процесу приходить у стан рівноваги за деякої глибини реакції $0 < \zeta < 1$ (рис.), за якої

$$dG = \sum_i \mu_i dn_i = \sum_i \mu_i \nu_i d\zeta = 0 \qquad (5)$$

або

$$\sum_i \nu_i \mu_i = 0\,. \qquad (6)$$

Зміна функції Гіббса за абсолютною величиною дорівнює максимальній роботі реакції: $\Delta G = |Ap|$, яка є мірою хімічної спорідненості. Отже, у міру наближення до рівноваги $A_p \to 0$.

При збільшенні хімічної спорідненості (чим більша вихідна концентрація реагуючих компонентів A і B – див. нижче) зростає максимальна робота реакції до повноти реакції в напрямку, що визначається знаком A_p.

Для бімолекулярної реакції

$$aA + bB \leftrightarrow cC + dD \qquad (7)$$

$$Ap = RT\left(\ln K_p - \frac{P_C^c \cdot P_D^d}{P_A^a \cdot P_B^b}\right), \qquad (8)$$

тобто умовою рівноваги є

$$\frac{p_C^c \cdot p_D^d}{p_A^a \cdot p_B^b} = K_p(T) \qquad (9)$$

Саме такий підхід, пов'язаний з перевіркою умови (9) – відповідності складу суміші константам рівноваги окремих реакцій за відповідної температури, було використано для оцінювання ступеня рівноважності продуктів газифікації різних твердих і рідких органічних і біопродуктів.

Інший випробуваний метод полягав у спробі безпосередньо зіставити розрахунковий склад рівноважних продуктів реакції, визначений через поелементний склад вихідних речовин, що піддаються газифікації.

Для реакції (7) вираз (6) набуває вигляду

$$a\mu_A + b\mu_B = c\mu_C + d\mu_D, \qquad (10)$$

а з використанням виразу, що зв'язує потенціали компонентів зі значеннями потенціалів індивідуальних речовин

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln p_i / p_0 = \mu_i^0 + RT \ln p_i \quad (11)$$

В умовах стандартного тиску $p_0 = 1$ бар приходимо до залежності

$$\ln Kp = \ln \prod_{(i)} p_i^{\nu_i} \quad (12)$$

Зокрема, для реакції (7) приходимо до відомого виразу із закону Вант-Гоффа:

$$\ln Kp = \ln \frac{P_C^c \cdot P_D^d}{P_A^a \cdot P_B^b} = -\frac{\Delta G^0}{RT} \quad (13)$$

і до підтвердження рівняння (9).

1. Визначення констант рівноваги реакцій газифікації біомаси

У статті [7] проводиться порівняння значень фізичної та хімічної ексергій для продуктів газифікації різних видів біомаси. Розглянуто сім газоподібних палив, отриманих з біологічної сировини.

Щоб для розрахунків застосовувати отримані нами формули, необхідно впевнитися, що продукти газифікації є рівноважною газоподібною сумішшю. Для цього необхідно знайти константи хімічних реакцій газифікації. Для кожного палива визначили константи рівноваги трьох реакцій, двома способами, як приклад розглянуто процес газифікації вугілля.

Реакція водяного газу:

$$H_2O + CO = CO_2 + H_2 \quad (14)$$

1 спосіб. За об'ємним вмістом компонентів

$$K_{p(фактич)} = \frac{P_{CO2} \cdot P_{H2}}{P_{H2O} \cdot P_{CO}} =$$

$= (0{,}009 \cdot 0{,}158) / (0{,}005 \cdot 0{,}324) = 0{,}877$ атм^2

2 спосіб. Аналітичний, використовуючи табличні значення констант рівноваги для відомих елементів

$$K_{p(теор)} = \frac{K_{H2O} \cdot K_{CO}}{K_{CO2} \cdot K_{H2}} =$$

$= (4{,}676 \cdot 10^{-45} \cdot 2{,}134 \cdot 10^{-33}) / (1{,}538 \cdot 10^{-62} \cdot 6{,}616 \cdot 10^{-16}) =$
$= 0{,}98$ атм^2.

Бачимо невелику відмінність в отриманих значеннях, що пояснюється невідповідністю процесу рівноважному за даної температури газифікації. Наочно це видно на графіку (рис. 1), коли фактично отримані значення «випадають» з лінії, побудованої на основі теоретично отриманих точок. Це означає, що за цієї реакції газифікація цього виду біомаси проходить неефективно.

Реакція парового реформінгу метану

$$CH_4 + 2H_2O = CO_2 + 4H_2 \quad (15)$$

$$K_{p(фактич)} = \frac{P_{CO2} \cdot P_{H2}^{\ 4}}{P_{H2O}^{\ 2} \cdot P_{CH4}} =$$

$= (0{,}009 \cdot 0{,}158^4) / (0.001 \cdot 0{,}005^2) = 224$ атм^2

$$K_{p(теор)} = \frac{K_{H2O}^{\ 2} \cdot K_{CH4}}{K_{CO2} \cdot K_{H2}^{\ 4}} =$$

$= ((1{,}912 \cdot 10^{-55}) \cdot (2{,}134)^2 \cdot 10^{-66})) / (1{,}538 \cdot 10^{-62} \cdot (6{,}616)^4 \cdot 10^{-64}) =$
$= 295$ атм^2.

Реакція конверсії метану

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 \quad (16)$$

$$K_{p(фактич)} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H2}^{\ 3}}{P_{H2O} \cdot P_{CH4}} =$$

$= (0{,}324 \cdot 0{,}158^3) / (0{,}001 \cdot 0{,}005) = 255$ атм^2

$$K_{p(теор)} = \frac{K_{H2O} \cdot K_{CH4}}{K_{CO} \cdot K_{H2}^{\ 3}} =$$

$= (1{,}912 \cdot 10^{-55} \cdot 2{,}134 \cdot 10^{-33}) / (4{,}676 \cdot 10^{-45} \cdot 6{,}616^3 \cdot 10^{-48}) =$
$= 301$ атм^2.

Аналогічні дії проводимо для інших продуктів газифікації. Тоді значення констант рівноваги, що залежать від мольних часток компонентів і температур газифікації, вибудовуватимуться вздовж теоретично отриманої лінії (рис. 1, рис. 2, рис. 3).

Загалом, точки на графіках, отримані за фактичними розрахунками і теоретичними (табличними) даними, показують високий ступінь збігу. Це дає нам підстави приймати продукти газифікації біомаси за рівноважні газові суміші, а отже, користуватися табличними даними і формулами для розрахунків рівноважного складу.

Користуючись наведеними в [7] даними, наведемо склад біомаси, що включає органічні елементи та вологу (табл. 1).

2. Основні рівняння процесу газифікації

Розглянемо процес газифікації окремих речовин Для розрахунку рівноважного складу ПЗ будемо використовувати программу TERRA**.**

Вугілля/Coal

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 1105 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

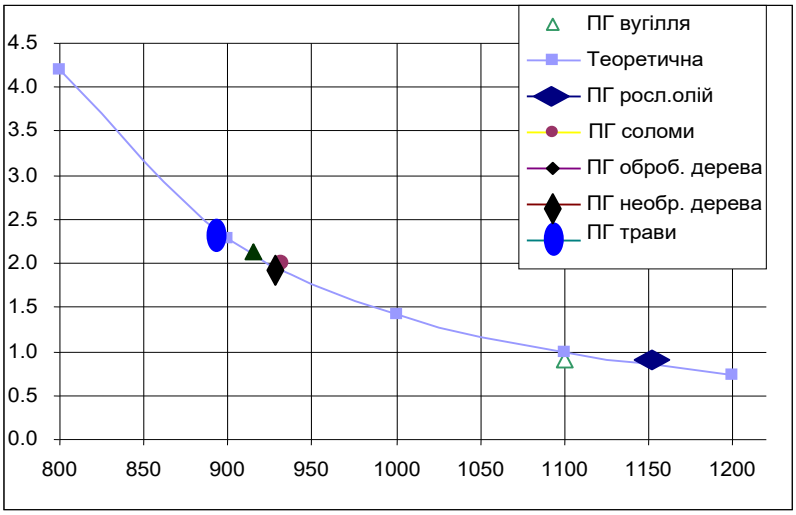


Рис. 1. Константи рівноваги реакцій газифікації, розрахункові та теоретичні (реакція $H_2O + CO$)

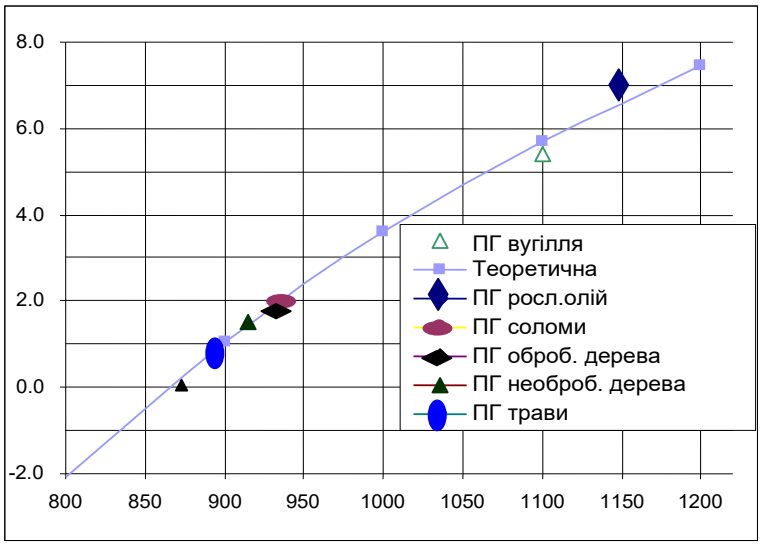


Рис. 2. Константи рівноваги реакцій газифікації, розрахункові та теоретичні (реакція $CH_4 + 2H_2O$)

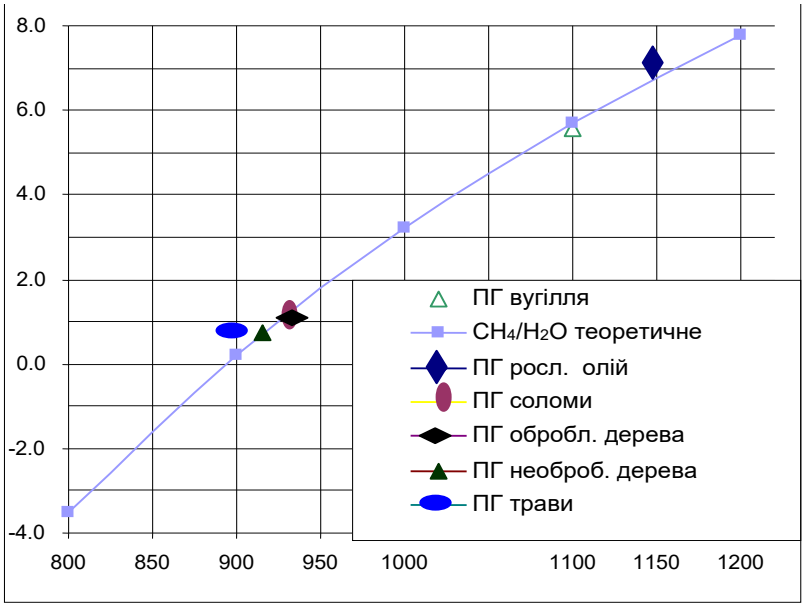


Рис. 3. Константи рівноваги реакцій газифікації, розрахункові та теоретичні (реакція $CH_4 + H_2O$)

Таблиця 1

Склад вугілля та біомаси для процессу газифікації

№	Паливо	Елементарний склад, % маси					Вода, % загальної маси біомаси
		C	H	O	N	S	H2O
1	Вугілля	78,2	4,93	13,3	1,45	1,69	11,5
2	Рослинні олії	75,4	11,7	12,9	0,0	0,0	0,0
3	Солома	48,9	5,97	43,9	0,82	0,15	12,7
4	Оброблена деревина	51,5	6,03	41,3	1,22	0,09	14,6
5	Необроблена деревина	50,8	6,06	42,7	0,36	0,07	19,8
6	Трава	49,7	6,00	42,7	1,32	0,18	24,2

C = 78,2 кг; H = 4,93 кг; O = 13,3 кг; N_2 = 1,66 кг; S = 1,91 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α, необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:

$$6{,}52C + 2{,}47H_2 + 0{,}42O_2 + 0{,}052N_2 + 0{,}05S + \\ + 0{,}8H_2O + 7{,}56O_2 + 28{,}4N_2$$

α = 0.23.

Рослинні олії /Vegetable oils

Проведемо зіставлення наведеного складу продуктів газифікації ПГ з продуктами згоряння ПЗ за тих самих термодинамічних умов: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 1148 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 75,4 кг; H_2 = 11.7 кг; O_2 = 12,9 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α, необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення Air flow (кг / кг біомаси) 3.837.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:

$$6{,}37C + 5{,}85H_2 + 0{,}4O_2 + 8{,}9O_2 + 33{,}4N_2 = \\ = 6{,}37CO_2 + 5{,}85H_2O + 33{,}4N_2$$

Необхідний коефіцієнт надлишку повітря α = 0.274.

Солома/Straw

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 932 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 48,9 кг; H = 5,97 кг; O = 43,9 кг; N2 = 0,82 кг; S = 0 ,15 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α, необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення Air flow.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:

$$4C + 3H_2 + 1{,}37O_2 + 0{,}03N_2 + 0{,}005S + \\ + 0{,}87H2O + 3{,}7O_2 + 13{,}95N_2 = \\ = 4CO_2 + 3H_2O + 13{,}95N_2$$

Необхідний коефіцієнт надлишку повітря α = 0.23.

Оброблена деревина /Treated wood

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 928 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 51,5 кг; H = 6,03 кг; O = 41,3 кг; N = 1,22 кг; S = 0,09 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α, необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:

$$4{,}3C + 3{,}15H_2 + 1{,}3O_2 + 0.04N_2 + 0.003S + \\ + 1H2O + 4.1O_2 + 15.48N_2$$

Необхідний коефіцієнт надлишку повітря α = 0.23.

Необроблена деревина /Unreated wood

Умови реакції: тиск 0,1013МПа, температура процесу 915К. Для розрахунку рівноважного складу ПЗ використовуємо програму FUEL. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 50,8 кг; H = 6,06 кг; O = 42,7 кг; N = 0,36 кг; S = 0,07 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α, необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:

$$4{,}3C + 3{,}15H_2 + 1{,}3O_2 + 0{,}04N_2 + 0{,}003S + \\ + 1H2O + 4{,}1O_2 + 15{,}48N_2$$

Необхідний коефіцієнт надлишку повітря α = 0,23.

Трава/Grass

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 894 К. Для розрахунку рівноважного складу ПЗ використовуємо програму FUEL. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 49,7 кг; H = 6 кг; O = 42,7 кг; N = 1,32 кг; S = 0,18 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α, необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:

$$4{,}1C + 3H_2 + 1{,}3O_2 + 0{,}05N_2 + 0{,}006S + \\ + 1{,}9H2O + 3{,}5O_2 + 13{,}3N_2$$

Необхідний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0{,}2$.

Порівняємо результати наших розрахунків і експериментальний дані з [7], результати порівняння наведені в табл. 2.

Розрахуємо відносну похибку проведених розрахунків за кожним компонентом (табл. 3).

Проаналізувавши отримані графіки, що базуються на рівноважних реакціях газифікації, а саме реакції водяного газу реакція (14), парового реформінгу метану реакція (15) та конверсії метану, реакція (16), можна зробити ряд важливих висновків. Високий вміст CO у продуктах газифікації вказує на домінування реакції (16), особливо при підвищених температурах, оскільки рівновага зміщується в бік утворення CO і H_2.

Реакція (14) відіграє важливу роль у формуванні водню, проте її рівноважний стан залежить від температури та співвідношення реагентів.

Таблиця 2

Порівняння розрахункових та експериментальних складів продуктів газифікації вугілля та біомаси

№	Тип палива	Джерело	*T*(K)	Air flow (кг/кг біомаси)	Склад продуктів газифікації (мольні долі)						
					H_2O	N_2	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2S
1	Вугілля	[1]	1105	2,836	0,005	0,500	0,158	0,324	0,009	0,001	0,003
		Наш розрахунок			0,004	0,500	0,177	0,304	0,007	0,001	0,001
2	Рослинні олії	[1]	1148	3,837	0,003	0,467	0,251	0,275	0,003	0,001	0,000
		Наш розрахунок			0,003	0,455	0,267	0,270	0,003	0,002	0,000
3	Солома	[1]	952	1,401	0,063	0,384	0,225	0,205	0,113	0,010	0,000
		Наш розрахунок			0,060	0,383	0,227	0,210	0,108	0,011	0,000
4	Оброблена деревина	[1]	928	1,628	0,062	0,409	0,213	0,194	0,112	0,010	0,000
		Наш розрахунок			0,060	0,402	0,220	0,199	0,107	0,113	0,000
5	Необроблена деревина	[1]	915	1,452	0,076	0,380	0,227	0,177	0,126	0,013	0,000
		Наш розрахунок			0,074	0,375	0,234	0,181	0,121	0,015	0,000
6	Трава	[1]	894	1,240	0,097	0,363	0,232	0,146	0,145	0,018	0,000
		Наш розрахунок			0,088	0,385	0,223	0,148	0,138	0,018	0,000

Таблиця 3

Відносна похибка розрахунку теоретичного складу продуктів згоряння порівняно з експериментальними даними

№	Тип палива	Відносна похибка розрахунку, %						
		H_2O	N_2	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2S
1	Вугілля	12	0	12	6	19	0	67
2	Рослинні олії	0	3	6	2	0	82	0
3	Солома	3	0.3	0.9	2	4	10	0
4	Оброблена деревина	3	2	3	3	4	15	0
5	Необроблена деревина	3	1	3	2	4	15	0
6	Трава	9	6	4	1	5	0	0

За низьких температур реакція (14) зміщується вліво, що сприяє утворенню CO_2, тоді як при підвищенні температури концентрація CO зростає. Паровий реформінг метану (16) є основним механізмом утворення H_2, що підтверджується значним збільшенням його концентрації у високотемпературному діапазоні. Залежно від вихідної сировини вміст H_2 може суттєво змінюватися: біомаса з високим вмістом кисню сприяє утворенню більшої кількості CO_2 та водяної пари, що може знижувати концентрацію CO і H_2. Динаміка зміни рівноважних констант K_p свідчить про високу кореляцію між розрахунковими та експериментальними даними, що підтверджує ефективність використаної методології. Зокрема, при підвищенні температури значення K_p для реакцій (14) та (16) збільшується, що вказує на зміщення рівноваги у бік утворення CO та H_2, тоді як для реакції (16) рівноважна константа також зростає, що сприяє підвищенню концентрації H_2.

Отримані результати демонструють, що температура є ключовим фактором у визначенні складу генераторного газу: при 800–900°C і водяної пари, що свідчить про домінування реакцій окислення, тоді як при 1000–1100°C основними продуктами є CO і H_2, що підтверджує переважання реакцій відновлення. Вплив складу сировини також відіграє значну роль: деревина через високий вміст кисню продукує більше CO_2, тоді як пластик і гума через високий вміст вуглецю та водню сприяють утворенню CO та H_2. Це підтверджується відповідними рівноважними концентраціями компонентів газової фази. Таким чином, процес газифікації може бути оптимізований шляхом регулювання температурного режиму та співвідношення реагентів, що дозволить отримати генераторний газ із бажаним складом для конкретних енергетичних або хімічних застосувань.

Висновки. В роботі розвинутий теоретичний підхід щодо розрахунку складу продуктів газифікації твердих палив, зокрема вугілля і біомаси, що базується на законах рівноважної термодинаміки. Представлено математичну модель визначення складу рівноважних продуктів згоряння на основі базових законів хімічної термодинаміки. Проведено аналіз основних рівнянь процесу газифікації з врахуванням впливу режимних параметрів (коефіцієнт надлишку повітря та температура процесу) на утворення продуктів газифікації.

Кореляція експериментальних і теоретичних даних підтверджує можливість прогнозування складу газової суміші на основі термодинамічного моделювання, що є важливим для проектування газифікаційних установок і визначення оптимальних умов процесу.

Список літератури:

1. Karp I.N., Pyanykh K.E., Antoshchuk T.A., Lysenko A.A. Results of laboratory and industrial tests of periodic-type gas generators. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. Volume 88, Issue 3. P 749–755. DOI: 10.1007/s10891-015-1246-y

2. Клименко В.М, Баштовий А.І., Зубенко В.І, Антощук Т.О. Дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі. *Промислова теплотехніка.* 2016. Т. 38, № 2. С. 26–33.

3. Allan M.M. Leal, William R. Smith. (2022). Inverse chemical equilibrium problems: General formulation and algorithm. *Chemical Engineering Science*. 2022. volume 252, 117162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117162

4. М.В. Цоколов Альтернативні види палива / Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство», 20-21 травня 2021 р., м. Київ. DOI: https://doi.org/10.20535/EHS.2021.233413

5. Romaniuk W, Savinykh P.A., Borek K., Plotnikowa Y.A., Palitsyn A.V., Korotkov A.N., Roman K., Roman M. Improvement of Gas Generator Technology for Energy Processing of Agricultural Waste. *Energies*. 2021; 14 (12) : 3642. DOI: https://doi.org/10.3390/en14123642

6. Карп І.М., Нікітін Є.Є., П'яних К.Є., Зайвий О.М. Напрями заміщення природного газу альтернативними видами палива та енергії в промисловості та комунальній енергетиці. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2009, № 4. С. 16–26.

7. Plasinski K.J., Prins M.J., Pierik A. Exergetic Evaluation of Biomass Gasification. *Energy*. 2006, Volume 32, Issue 4. P. 568–574. DOI:https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.024

8. Warnatz J.,·Maas U., Dibble R.W. Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation / 4th ed. Springer, 2006. 378 p.

Novosad Yu.I., Vorobiov M.V. ANALYSIS OF BIOMASS GASIFICATION PROCESSES AND FORECASTING THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF SYNGAS

Replacing natural gas with alternative fuels is a reliable way to ensure the state's energy independence. Along with the widespread development of new technologies for the use of alternative fuels, in particular, such as direct combustion of biomass, for existing fuel-using equipment that burns natural gas, more easy technological option is to switch the equipment to the combustion of alternative gas fuel. Such alternative gas fuels can be biogas, landfill gas, or generator gas formed from coal or biomass.

Since generator gas can be obtained directly at the facility where specific fuel – using equipment is installed, it is important and relevant to assess the composition and properties of this fuel (*generator gas*) *depending on the composition of the raw material-coal, biomass or waste of various origins.*

The paper is devoted to determining the composition of generator gas depending on the initial composition of raw materials, the process temperature and the coefficient of excess air in the gas generator. A theoretical approach to calculating the composition of gasification products of solid fuels, in particular coal and biomass, based on the laws of equilibrium thermodynamics is developed. A mathematical model for determining the composition of equilibrium combustion products based on the Basic Laws of chemical thermodynamics is presented. The main equations of the gasification process are analyzed, taking into account the influence of regime parameters (*excess air coefficient and process temperature*) *on the formation of gasification products. The results show that temperature is a key factor in determining the composition of the generator gas: at 800–900°C and water vapor, which indicates the dominance of oxidation reactions, while at 1000–1100°C the main products are CO and* H_2 *which confirms the predominance of reduction reactions. The influence of raw material composition also plays a significant role: wood, due to its high oxygen content, produces more* CO_2*, while plastic and rubber, due to their high carbon and hydrogen content, contribute to the formation of CO and H2.*

The correlation of experimental and theoretical data confirms the possibility of predicting the composition of the gas mixture on the basis of thermodynamic modelling, which is important for the design of gasification plants and determining the optimal process conditions.

Key words: *natural gas substitution, fuel gasification processes, equilibrium gasification products, biomass, equilibrium constants of chemical reactions.*

УДК 621.165.62
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/22

Пешко В.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сепік А.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГРАНИЧНІ УМОВИ ТЕПЛООБМІНУ В ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ РОТОРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-200-130

У статті розглянуто питання визначення граничних умов теплообміну на зовнішній поверхні проточної частини ротора середнього тиску парової турбіни К-200-130. Актуальність дослідження зумовлена тим, що всі турбіни цього типу, які експлуатуються в Україні, вже вичерпали свій проєктний та парковий ресурс, однак продовжують відігравати ключову роль у маневровому регулюванні та балансуванні навантажень в об'єднаній енергосистемі країни. Визначення граничних умов теплообміну є критично необхідним для побудови адекватної термомеханічної моделі та оцінки залишкового ресурсу турбіни. У роботі виконано аналіз експлуатаційних даних турбіни К-200-130 енергоблоку ДТЕК Бурштинська ТЕС, що дозволило встановити характер теплових навантажень, особливо в умовах частих пусків, зупинок та роботи в позанормативних режимах. Проведено синтез проточної частини циліндра середнього тиску на основі рівнянь термогазодинаміки. У результаті чисельного моделювання отримано розподіли термодинамічних та кінематичних параметрів пари по кожному зі ступенів турбіни. Зовнішню поверхню ротора розділено на 65 характерних областей. Для кожної з них були застосовані відповідні рівняння подібності для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі. Встановлено п'ять основних груп зон: міжлопаткові поверхні дисків ротора, торцеві поверхні дисків ступенів, ділянки діафрагмових ущільнень, ліві та праві галтелі дисків. Результати розрахунків продемонстрували системне зниження коефіцієнтів тепловіддачі в напрямку від входу до вихлопу, а також різкі зміни у зонах із змінами геометрії. Наведені результати ляжуть в основу подальшого розрахунку термонапруженого стану ротора за допомогою числового моделювання, що дозволить визначити критичні зони з точки зору втомної міцності та сформувати рекомендації щодо подовження ресурсу. Робота є важливим кроком у створенні цифрових моделей реальних турбін для потреб моніторингу та прогнозування технічного стану обладнання.

Ключові слова: *парова турбіна, граничні умови теплообміну, ротор середнього тиску, теплообмін, термонапружений стан, ресурс, подібність, моделювання, коефіцієнт тепловіддачі.*

Постановка проблеми. Парова турбіна типу К-200-130 є однією з ключових ланок у структурі енергетичної системи України, оскільки використовується для маневрування та балансування навантажень в енергомережі. На сьогоднішній день в експлуатації перебуває велика кількість таких турбін, кожна з яких уже повністю вичерпала як проєктний, так і парковий ресурс. Продовження їхньої експлуатації потребує чіткого розуміння залишкового ресурсу, що, у свою чергу, неможливе без достовірного визначення теплового стану основних вузлів турбіни в різних режимах роботи.

Особливу увагу в цьому контексті слід приділити проточній частині ротора середнього тиску, де теплові навантаження суттєво впливають на напружено-деформований стан матеріалу. Практичний досвід експлуатації показує, що саме ротор середнього тиску є найбільш вразливим елементом, який лімітує ресурс турбіни К-200-130 та зазнає пошкоджень у першу чергу. Для адекватного визначення температурного поля необхідно правильно задати граничні умови теплообміну (ГУ), які формуються на основі параметрів робочого тіла – пари в проточній частині. Отже, без попереднього розрахунку термодинамічних параметрів пари в робочому потоці неможливо сформулювати коректні граничні умови для подальшого моделювання теплового стану ротора.

Таким чином, актуальність дослідження визначається нагальною потребою в подовженні ресурсу турбін К-200-130 та забезпеченні їхньої надійної експлуатації в умовах тривалої роботи

поза межами номінального ресурсу, що вимагає науково обґрунтованого підходу до визначення теплових навантажень на основі точних граничних умов теплообміну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливої актуальності набувають дослідження, що спрямовані на уточнення теплового стану елементів турбін для оцінки їх залишкового ресурсу. Однією з ключових задач у цьому контексті є встановлення граничних умов теплообміну, що вимагає точного визначення параметрів пари у проточній частині.

Питання моделювання та оптимізації проточних частин турбін розкриті в монографії О. Усатого [1, с. 14–78], де наведено методику всережимної багатокритеріальної оптимізації з урахуванням реальних режимів експлуатації. У межах цього підходу синтез проточної частини дозволяє отримати розподіли термодинамічних параметрів, що формують основу для розрахунку граничних умов у теплотехнічних задачах.

Розробка конструктивних рішень для турбін нового покоління висвітлена у публікації О. Авдєєвої, О. Усатого та О. Водки [2, с. 289–298], де детально проаналізовано геометричні та енергетичні параметри високонапірних ступенів. Це дозволяє реалізувати ефективну адаптацію існуючих моделей до реальних режимів експлуатації.

Ще один важливий напрям – створення макромоделей елементів проточної частини. У роботі О. Усатого, О. Авдєєвої, Д. Максюти та П. Туана (P. Tuan) [3, с. 020025] продемонстровано можливість використання методів планування експерименту (DOE) для формалізації теплообмінних процесів і зменшення обсягу експериментів без втрати точності.

У контексті теплового стану елементів турбіни критичним є аналіз механізмів старіння матеріалів ротора. Зокрема, В. Пешко та А. Бовсуновський [4, с. 1143–1156] описали закономірності росту тріщин при теплових навантаженнях пуску, а А. Азіз (A. Azeez) із колегами [5, с. 102510] змоделювали поведінку сталей у циклічному деформуванні з урахуванням локальних напружень.

М. Банашкевіч (M. Banaszkiewicz) [6, с. 311–323] запропонував методику онлайн-моніторингу втомного ресурсу роторів, яка може бути корисною для систем К-200-130. У роботі Р. Шерфединова та О. Усатого [7, с. 5–14] викладено підхід до моделювання в проточній частині турбіни на основі повідсікової методики, що дозволяє коригувати теплові умови при зупинці.

Монографія О. Черноусенко, Д. Риндюка та В. Пешко [8, с. 308] присвячена комплексному підходу до оцінки залишкового ресурсу турбін, у тому числі з використанням інформації про аварійні режими. У дослідженні С. Ямамото (S. Yamamoto) та ін. [9, с. 117380] запропоновано чисельно-аналітичний підхід до оцінки продуктивності турбін середнього тиску в реальних умовах експлуатації.

В. Ванг (W. Wang) із колегами [10, с. 471–483] показали, як температурні транзієнти впливають на втомне пошкодження ротора в процесі експлуатації. Нейромережеві методики прогнозування ресурсу описано в роботі С. Чжао (X. Zhao) та співавт. [11, с. 105435], що дозволяє оцінювати довговічність за великим обсягом даних.

М. Банашкевіч (M. Banaszkiewicz) [12, с. 763–776] також розробив методи онлайн-контролю теплових напружень, які важливі при частих зупинках турбін. Розробка системи раціонального режиму експлуатації представлена в роботі О. Черноусенко та ін. [13, с. 14–23], де сформовано основу для ресурсозбереження шляхом оптимізації навантажень.

Таким чином, аналіз наукової літератури показує, що встановлення граничних умов теплообміну базується на точному визначенні параметрів пари в проточній частині, які можуть бути отримані в результаті синтезу геометрії та математичного моделювання. Сукупність цих підходів дозволяє створити надійні термомеханічні моделі, що дають змогу оцінити залишковий ресурс турбін, які вичерпали номінальний строк експлуатації.

Постановка завдання. Метою статті є визначення граничних умов теплообміну на зовнішній поверхні проточної частини ротора середнього тиску турбіни К-200-130. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

– аналіз та систематизація експлуатаційних даних турбіни К-200-130 енергоблоку ДТЕК Бурштинська ТЕС;

– синтез проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-200-130 для встановлення основних термодинамічних та кінематичних параметрів пари;

– визначення граничних умов теплообміну на різних поверхнях ротора середнього тиску за допомогою експериментальних рівнянь подібності.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу та подальших розрахунків за основу була взята станція однієї з найбільших енергогенеруючих

компаній України – ДТЕК Бурштинська ТЕС. Яка є типовим представником енергогенеруючих потужностей, що використовують парові турбіни типу К-200-130. Враховуючи понад 30-річний період експлуатації, зазначене обладнання неодноразово зазнавало навантажень, що виходять за рамки номінальних режимів, зокрема через часті пуски, зупинки та переходи на часткові навантаження в умовах маневрової генерації. Це обумовлює потребу в детальному аналізі фактичних параметрів, які визначають термодинамічний стан пари та впливають на теплові умови роботи ротора середнього тиску.

У рамках цього дослідження було зібрано та оброблено великий обсяг експлуатаційної інформації, включаючи:

- добові графіки навантаження турбіни за період останніх трьох років;
- значення тиску та температури пари на вході та виході з циліндра середнього тиску, а також у точках відбору пари;
- значення тиску насичення в системі регенерації;
- температури охолоджуючих потоків та масові витрати в конденсаційному тракті.

Ці дані були проаналізовані на предмет відхилення від проєктних значень, частоти появи критичних режимів, а також циклічності теплових навантажень. Зокрема, встановлено, що середня температура пари на вході до ЦСТ за останній рік становить 537–540°C, а максимальні коливання тиску в першому відборі досягають 1,5 МПа. Частота переходів із номінального на часткове навантаження становить у середньому 2,7 рази на добу, що свідчить про підвищене тепломеханічне навантаження на ротор.

Окрему увагу було приділено вивченню даних щодо аварійних зупинок. Аналіз журналів технічного стану виявив, що близько 18% усіх зупинок супроводжувались різким падінням температури понад 10°C/хв, що створює умови для теплових ударів. Це особливо критично для сталей типу 25Х1М1ФА, які використовуються в конструкції ротора середнього тиску, і схильні до розвитку малоциклової втоми в таких умовах.

Систематизація експлуатаційних даних дала змогу не лише побудувати достовірну теплову модель, але й виявити найбільш напружені зони експлуатації, де необхідно уточнювати граничні умови теплообміну. Виявлені особливості режимів роботи турбіни на Бурштинській ТЕС було враховано при синтезі геометрії проточної частини та побудові математичної моделі.

Проточна частина (ПЧ) циліндра середнього тиску (ЦСТ) складається з 11 ступенів, які в технічній документації мають нумерацію з 13 по 23. Ця частина турбіни має чотири нерегульовані відбори пари, з яких три розташовані в межах проточної частини, а один – у вихлопі. Ескіз конструкції ПЧ ЦСТ наведено на рис. 1.

Математична модель синтезу течії пари в проточній частині формується на базі фундаментальних рівнянь термо- та гідродинаміки, а саме: рівнянь збереження енергії, нерозривності течії, рівнянь процесу і стану, кінематичних співвідношень, що пов’язують кути і швидкості потоку. Зокрема, для простору проточної частини за сопловим апаратом рівняння нерозривності з врахуванням рівнянь енергії, процесу і стану:

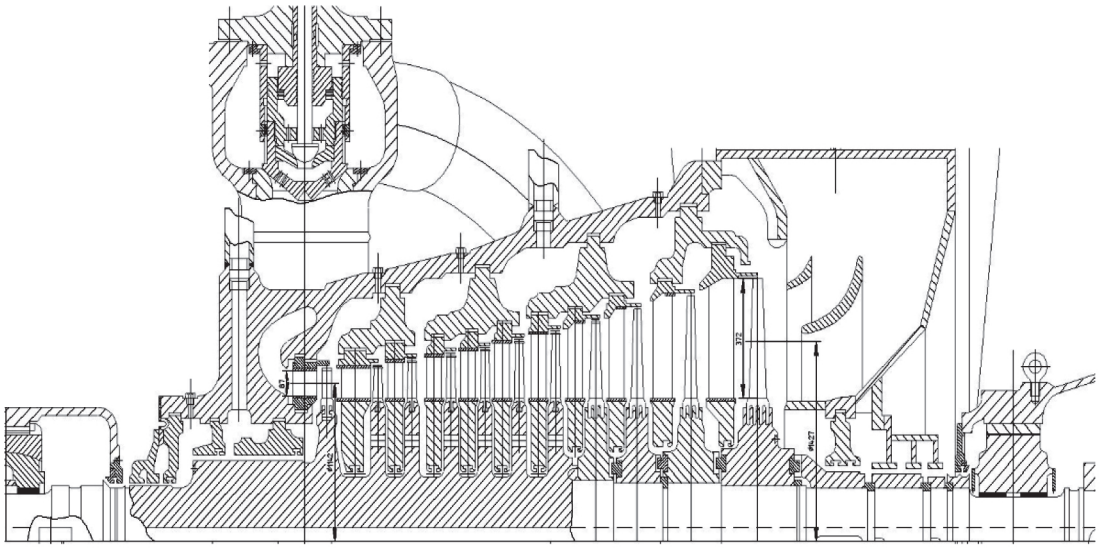


Рис. 1. Ескіз проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-200-130

$$G_1 = \frac{C_{1z}F_1}{v_1} = \frac{C_1 \sin\alpha_1 F_1}{v_1\left(p_1\left(h_0 - \frac{C_1^2}{2\varphi^2}; S_0\left(p_0; h_0\right)\right); h_0 - \frac{C_1^2}{2}\right)} \quad (1)$$

Аналогічне рівняння нерозривності для простору за робочою решіткою турбіни:

$$G_2 = \frac{W_{2z}F_2}{v_2} = \frac{W_2 \sin\beta_2 F_2}{v_2\left(p_2\left(H + \frac{u^2 - W_2^2}{2\psi^2}; S_1\left(p_1; h_1\right)\right); H + \frac{u^2 - W_2^2}{2\psi^2}\right)} \quad (2)$$

Ці рівняння дозволяють врахувати зміну швидкостей, тиску, ентальпії та інших характеристик пари при її протіканні через кожен ступінь турбіни. Розрахунки були проведені поетапно для кожного ступеня, що дозволило отримати повну картину розподілу термодинамічних та кінематичних параметрів пари у всій ПЧ ЦСТ.

Основні кінематичні та термодинамічні результати розрахунку параметрів пари представлено у графічному вигляді на рис. 2 і 3.

Як показано на рис. 2, що відображає результати числового моделювання, у кожному наступному сопловому сегменті турбіни відбувається

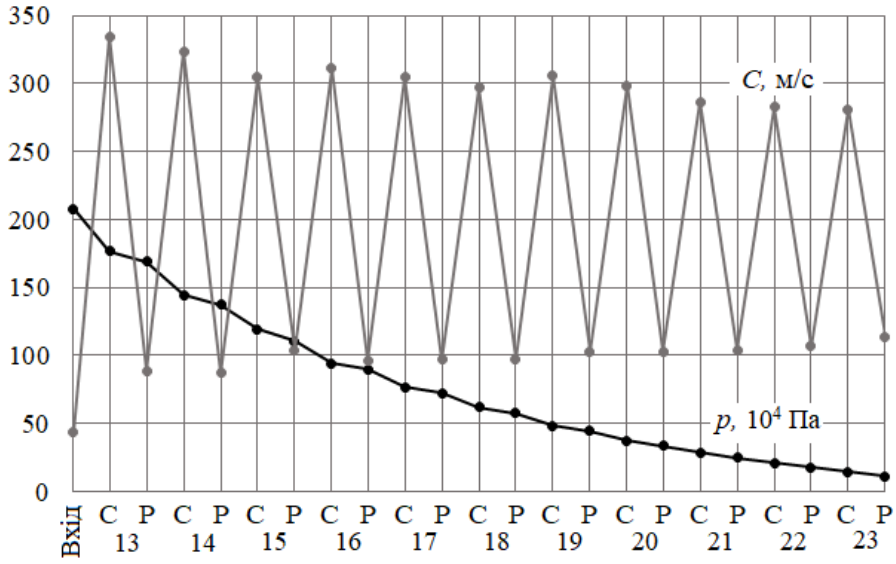
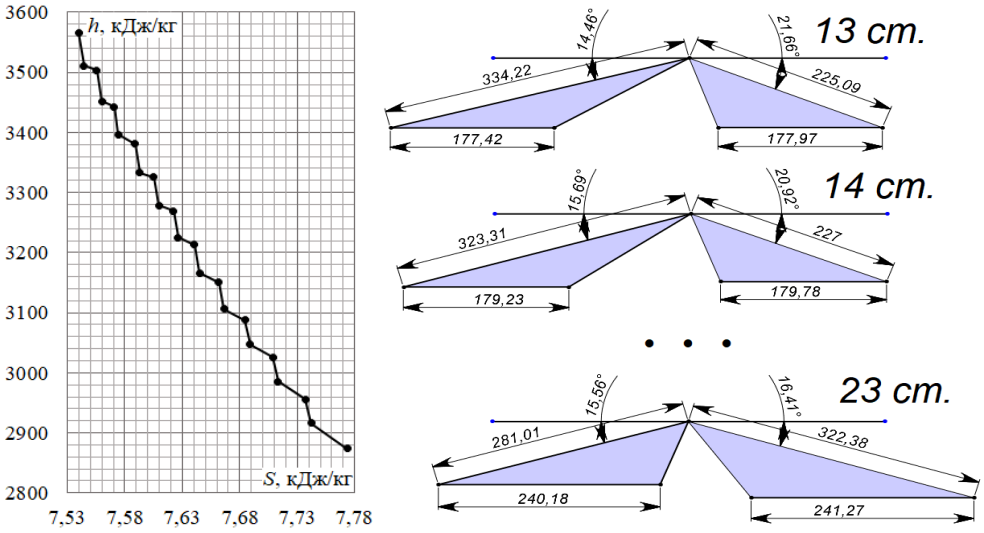


Рис. 2. Діаграма зміни тиску та абсолютної швидкості пари на ступенях турбіни (С – соплова група, Р – робоча решітка ступеня)



а б

Рис. 3. Процес розширення пари в h, S діаграмі (а) та трикутники швидкостей для деяких ступенів (б) ПЧ ЦСТ

поступове зниження тиску, тоді як абсолютна швидкість робочого тіла зростає. Подальше її зменшення відбувається внаслідок енергетичного перетворення під час взаємодії з робочою лопаткою.

На рис. 3а, відповідно до h, S-діаграми, спостерігається поступове зростання реактивності ступенів, що виражається у скороченні довжини вертикальних відрізків, які характеризують соплові апарати, та подовженні горизонтальних сегментів, що відповідають робочим лопаткам. На рис. 3б наведено трикутники швидкостей для перших двох і останнього ступеня. Кути входу пари в соплові апарати залишаються близькими до оптимального значення 15° на всіх ступенях, однак суттєве відхилення α_2 від 90° на кожному ступені спричиняє значні аеродинамічні втрати, пов'язані з вихідною швидкістю потоку.

Після завершення етапу синтезу ПЧ і моделювання розподілу параметрів пари було здійснено визначення граничних умов теплообміну на зовнішній поверхні ротора.

Граничні умови третього роду описують закономірності теплообміну між паровим середовищем та зовнішньою поверхнею ротора:

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)=\alpha(t_n-t_м) \qquad (3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; $t_п$, $t_м$ – температура пари та металу ротора відповідно.

Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі проточну частину ротора середнього тиску поділено на 65 характерних областей (рис. 4). Для кожної з поверхонь умови теплообміну суттєво відрізняються, що потребує використання спеціальних рівнянь подібності.

Зокрема, для міжлопаткових поверхонь дисків ротора (області 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45, 51, 57, 63 на рис. 2) використано наступне рівняння подібності:

$$Nu=0{,}0145\cdot Re^{0{,}8}\cdot Pr^{0{,}43}\cdot\beta^{1{,}54}\cdot K_{Tu}\cdot K_{об}\cdot\left(\frac{h}{b}\right)^{-0{,}7}\cdot\left(\frac{t}{b}\right)^{-0{,}2} \qquad (4)$$

де Nu, Re, Pr – числа подібності Нуссельта, Рейнольдса та Прандтля відповідно; β – коефіцієнт ефективних кутів робочих лопаток; K_{Tu}, $K_{об}$ – коефіцієнти турбулентності та обертання відповідно; h – стріла вигинання профілю лопатки, b – хорда робочої лопатки, t – відносний крок робочих лопаток.

Для решти областей ротора середнього тиску використано інші рівняння подібності, які можна об'єднати в наступні групи:

1) торцеві поверхні дисків ступенів – точки 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, 40, 44, 46, 50, 52, 56, 58, 62, 64 на рис. 2;

2) діафрагмові ущільнення – 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60;

3) ліві галтелі дисків ступенів, теплообмін на яких формується струменем пари з діафрагмових ущільнень – 1, 7, 13, 19, 25, 31, 37, 43, 49, 55, 61;

4) праві галтелі дисків, теплообмін на яких формується потоком між торцевою поверхнею поточного диску та наступної діафрагми – 5, 11, 17, 23, 29, 35, 41, 47, 53, 59, 65.

Результати проведених розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі для поверхонь ротора середнього тиску турбіни К-200-130 представлено на рис. 5.

На рис. 5 наведено розрахункові значення коефіцієнтів тепловіддачі на зовнішніх поверхнях ротора середнього тиску турбіни К-200-130, що були отримані за результатами моделювання теплообміну в окремих характерних областях. Для кожної з 65 умовно виділених зон на поверхні ротора було застосовано відповідне рівняння подібності, яке враховує геометричні, гідродинамічні та теплотехнічні особливості цієї ділянки.

Результати розрахунку дозволили класифікувати області за п'ятьма основними групами: міжлопаткові поверхні дисків ротора, торцеві

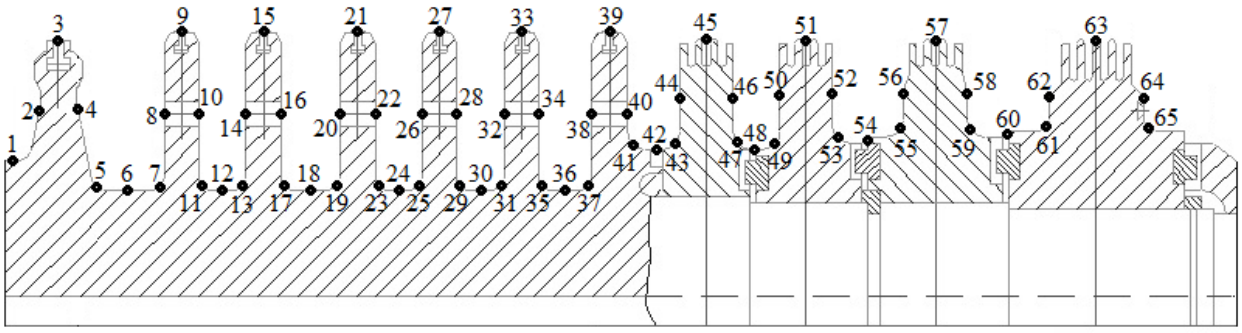


Рис. 4. Характерні області дослідження граничних умов теплообміну на зовнішній поверхні ротора середнього тиску турбіни К-200-130

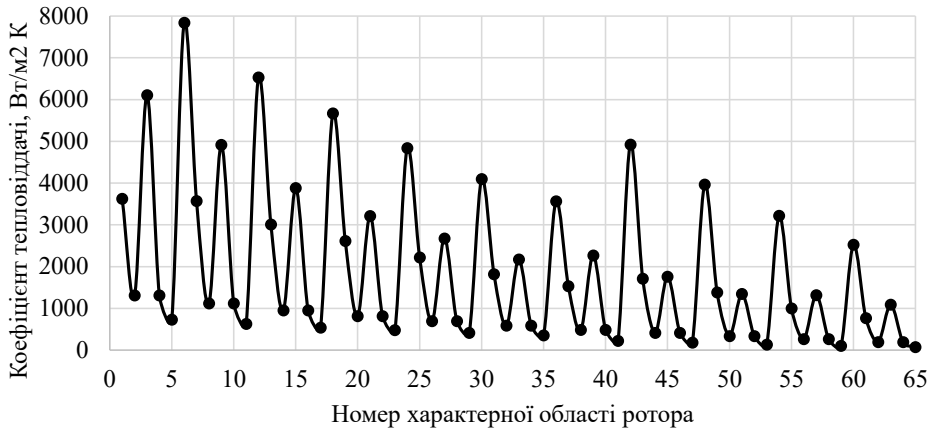


Рис. 5. Розрахункові коефіцієнти тепловіддачі на зовнішніх поверхнях ротора середнього тиску турбіни К-200-130

поверхні дисків ступенів, ділянки діафрагмових ущільнень, ліві та праві галтелі дисків. З рисунку видно, що загальна тенденція коефіцієнтів тепловіддачі характеризується поступовим зниженням значень від першого до останнього ступеня. Це зниження пов'язане з падінням тиску пари, зменшенням відносної швидкості потоку W_1 та зростанням його розрідженості у напрямку до вихлопу.

Окрему увагу привертають останні чотири ступені, де спостерігається різкий «стрибок» значень тепловіддачі. Це пояснюється змінами в геометрії соплових апаратів і робочих лопаток, а також особливими умовами течії пари, зокрема підвищеною турбулентністю та зміщеним профілем діафрагм. Саме в цих ділянках розрахунок граничних умов вимагає підвищеної точності, оскільки саме вони виявились найчутливішими до коливань експлуатаційних режимів за результатами аналізу фактичних даних.

Таким чином, представлений графік є ключовим аналітичним інструментом для визначення теплового стану ротора і закладення вихідних умов у наступні етапи термонапруженого аналізу.

На основі отриманих коефіцієнтів тепловіддачі, що були визначені для кожної з 65 характерних зон зовнішньої поверхні ротора, наступним етапом дослідження стане побудова математичної моделі термонапруженого стану ротора середнього тиску. Це моделювання буде проведено для умов номінальної роботи турбіни, з урахуванням розподілених граничних умов теплообміну, які є результатом попереднього етапу аналізу.

Розв'язання нестаціонарної задачі теплопровідності дозволить визначити температурні поля в тілі ротора в динаміці, враховуючи теплопровідність матеріалу, початкові умови та часову змінність температури пари. Отримані температурні розподіли стануть основою для оцінки напружено-деформованого стану за допомогою рівнянь механіки суцільного середовища. Особливу увагу буде приділено зонам концентрації температурних градієнтів, які мають вирішальне значення для виникнення термічних напружень і розвитку втомних тріщин.

Результати термомеханічного моделювання дадуть змогу оцінити граничні стани матеріалу ротора, встановити допустимі рівні напружень і виявити найбільш небезпечні зони з точки зору малоциклової втоми. На цій основі буде розроблено рекомендації щодо оптимізації режимів роботи, а також можливі заходи з реконструкції чи заміни окремих елементів для подовження ресурсу турбіни. Таким чином, модель термонапруженого стану завершить цикл оцінки теплового впливу на ротор і забезпечить комплексну картину його довговічності при подальшій експлуатації.

Висновки. У ході проведеного дослідження було визначено граничні умови теплообміну на зовнішній поверхні проточної частини ротора середнього тиску парової турбіни К-200-130. Враховуючи той факт, що всі експлуатовані в Україні турбіни цього типу вичерпали свій проєктний і парковий ресурс, встановлення теплового стану найбільш навантажених елементів, зокрема ротора середнього тиску, є вкрай важливим для оцінки залишкового ресурсу та забезпечення подальшої безпечної експлуатації.

На першому етапі було виконано системний аналіз фактичних експлуатаційних даних турбіни К-200-130 на прикладі енергоблоку Бурштинської ТЕС. У результаті було ідентифіковано

режими, що супроводжуються підвищеним тепловим навантаженням, виявлено частоту аварійних зупинок із тепловими ударами, а також встановлено циклічність зміни навантаження, що формує основу для термостресового впливу на ротор.

Другим етапом стало математичне моделювання термодинамічних і кінематичних параметрів пари в проточній частині ЦСТ, яке виконано на основі рівнянь термогазодинаміки. Усі 11 ступенів ЦСТ були проаналізовані щодо зміни тиску, швидкості та кута входу/виходу пари, що дозволило з високою точністю оцінити енергетичні перетворення в кожному ступені.

Наступним кроком стало зонування проточної частини ротора на 65 характерних областей, у межах яких розраховано локальні коефіцієнти тепловіддачі на основі спеціалізованих рівнянь подібності. Встановлено п'ять основних груп зон: міжлопаткові поверхні дисків ротора, торцеві поверхні дисків ступенів, ділянки діафрагмових ущільнень, ліві та праві галтелі дисків. Графічний аналіз показав закономірності розподілу тепловіддачі, зокрема плавне зменшення значень вздовж осі ротора та різкі зміни в останніх ступенях через зміну геометрії й режимів потоку.

Таким чином, отримані граничні умови теплообміну є базою для наступного етапу – термомеханічного моделювання ротора середнього тиску. Це дозволить не лише кількісно оцінити теплові напруження та виявити потенційно критичні зони, а й сформувати комплексні рекомендації з оптимізації режимів експлуатації або реконструкції турбіни. У перспективі результати дослідження можуть бути використані для побудови цифрових двійників турбін К-200-130 з метою прогнозування ресурсу в реальному часі.

Список літератури:

1. Усатий О. П. Всережимна багатопараметрична багатокритеріальна оптимізація проточної частини турбін в інтегрованому інформаційному просторі: дис. д-ра техн. наук: 05.05.16. Турбомашини та турбоустановки. Усатий Олександр Павлович; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2013. 364 с.

2. Avdeeva O., Usatyy O., Vodka O. Development of the typical design of the high-pressure stage of a steam turbine. Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Cham: Springer, 2020. P. 289–298. Lecture Notes in Mechanical Engineering. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_26

3. Usatyy O., Avdeeva O., Maksuta D., Tuan P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2047. Article 020025. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5081658

4. Peshko V. A., Bovsunovskyi A.P. Patterns of Growth of an Internal Annular Crack Under the Influence of Thermal Stresses During Turbine Startup. *Strength of Materials*. 2024. № 6 (55). P. 1143–1156. DOI: https://doi.org/10.1007/s11223-024-00604-0.

5. Azeez A., Eriksson R., Leidermark D., Calmunger M. Low cycle fatigue life modelling using finite element strain range partitioning for a steam turbine rotor steel. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2020. Vol. 107. Article 102510. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102510.

6. Banaszkiewicz M. The low-cycle fatigue life assessment method for online monitoring of steam turbine rotors. International Journal of Fatigue. 2018. Vol. 113. P. 311–323. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.02.032.

7. Шерфедінов Р., Усатий О. Оцінка можливості використання повідсікового моделювання процесів в проточній частині парової турбіни в задачах одночасної оптимізації теплових схем та турбін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2024. № 3. С. 5–14. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.01.

8. Черноусенко О. Ю., Риндюк Д. В., Пешко В. А. Оцінка залишкового ресурсу та подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3). Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020. 308 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41565.

9. Yamamoto S., Uemura A., Miyazawa H., Furusawa T., Yonezawa K., Umezawa S. et al. A numerical and analytical coupling method for predicting the performance of intermediate-pressure steam turbines in operation. Energy. – 2020. Vol. 198. Article 117380. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117380.

10. Wang W. Z., Buhl P., Klenk A., Liu Y. Z. The effect of in-service steam temperature transients on the damage behavior of a steam turbine rotor. International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 87. P. 471–483. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.040.

11. Zhao X., Ru D., Wang P., Gan L., Wu H., Zhong Z. Fatigue life prediction of a supercritical steam turbine rotor based on neural networks. Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 127. Article 105435. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105435.

12. Banaszkiewicz M. On-line monitoring and control of thermal stresses in steam turbine rotors. Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 94. P. 763–776. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.131.

13. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Chernov O., Goryazhenko V. Development of a system for estimating and forecasting the rational resource-saving operating modes of TPP. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 8(105). P. 14–23. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204505.

14. Balitskii A. I., Syrotyuk A. M., Kolesnikov V. O., Balitska V. O., Ivaskevych L. M., Havrilyuk M. R. The Effect of Absorbed Hydrogen on the Rotors of Steel Machining Products During Powerful Turbo Aggregate Repairs. Materials 2024. 17 (24), 6257. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17246257

Peshko V.A., Sepik A.V. BOUNDARY CONDITIONS OF HEAT EXCHANGE IN THE FLOW SECTION OF THE INTERMEDIATE PRESSURE ROTOR OF K-200-130 TURBINE

The article addresses the issue of determining the boundary conditions of heat exchange on the outer surface of the flow path of the intermediate-pressure rotor of the K-200-130 steam turbine. The relevance of the study is driven by the fact that all turbines of this type operating in Ukraine have already exhausted their design and park resource but continue to play a key role in load balancing and maneuver regulation within the country's unified power system. Determining the boundary conditions is critically necessary for constructing an adequate thermomechanical model and assessing the residual life of the turbine. The study analyzes operational data from the K-200-130 turbine at the DTEK Burshtynska TPP power unit, which made it possible to determine the nature of thermal loads, particularly under frequent startups, shutdowns, and off-nominal operating modes. The next step involved synthesizing the flow path of the intermediate-pressure cylinder based on thermogasdynamic equations. As a result of numerical simulation, distributions of thermodynamic and kinematic parameters of steam were obtained for each turbine stage. The subsequent stage of the research involved zoning the outer surface of the rotor into 65 characteristic regions. Appropriate similarity equations were applied to each of them to calculate heat transfer coefficients. Four main zone groups were identified: interblade surfaces, end face disks, diaphragm seals, and fillets. The calculation results demonstrated a consistent decrease in heat transfer coefficients from the inlet to the exhaust, as well as abrupt changes in areas with modified geometry. The presented results will form the basis for further calculation of the rotor's thermally stressed state using numerical modeling, enabling the identification of critical zones from the standpoint of fatigue strength and the formulation of recommendations for extending the turbine's service life. The work represents an important step in creating digital models of real turbines for the purposes of monitoring and forecasting the technical condition of equipment.

Key words: *steam turbine, heat exchange boundary conditions, intermediate-pressure rotor, heat transfer, thermally stressed state, turbine lifetime, similarity, modeling, heat transfer coefficient.*

УДК 697.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/23

Черноусенко О.Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Риндюк Д.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Затірка О.І.
Філія «Відокремлений підрозділ
«Рівненська атомна електрична станція» акціонерного товариства
«Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом»

РЕСУРСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОПРОВОДІВ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ

У статті представлено науково обґрунтований підхід до оцінки технічного стану трубопроводів теплових мереж, який базується на моделюванні теплового та напружено-деформованого стану, а також оцінці залишкового ресурсу з урахуванням реальних режимів експлуатації. Враховано вплив залишкових напружень, корозійного зношення, нерівномірного температурного поля та циклічного навантаження. Як приклад застосування моделі досліджено ділянку трубопроводу Ду100 з колінами та запірною арматурою. Побудовано температурне поле та визначено критичні зони теплових втрат. Аналіз напружень показав їх концентрацію в зонах геометричних переходів і арматури, де вони сягають 8,5–8,9 МПа. Проведено розрахунок залишкового ресурсу шляхом визначення циклічної та статичної пошкоджуваності металу, що дало змогу оцінити індивідуальний залишковий термін експлуатації. При режимі 105/75°С він становить понад 35 тис. годин (8,27 років). Розроблений підхід дає змогу виявити найуразливіші ділянки мережі, сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень щодо реконструкції та модернізації тепломереж. Результати можуть бути використані теплопостачальними підприємствами для стратегічного планування ремонтно-відновлювальних робіт з урахуванням технічного стану мереж. Реалізація запропонованих заходів сприятиме енергоефективності теплових систем та зменшенню витрат на їх обслуговування. Доведено, що проведення цілеспрямованого дослідження технічного стану трубопроводів теплових мереж є необхідною передумовою для підвищення надійності, ефективності й безпеки централізованого теплопостачання. Такий підхід дозволяє перейти від реактивної стратегії ремонту до проактивного управління життєвим циклом елементів теплової інфраструктури, що особливо важливо в умовах енергетичних викликів і обмежених ресурсів.

Ключові слова: *теплові мережі, ресурс, трубопроводи, математичне моделювання, температура, напружено-деформований стан.*

Постановка проблеми. Теплові мережі України характеризуються суттєвим рівнем фізичного зношення в процесі експлуатації, який в середньому сягає 68%, що призводить до зниження надійності систем теплопостачання, підвищених тепловтрат і збільшення витрат на аварійно-відновлювальні роботи. Особливо гостро ця проблема стоїть у великих містах, зокрема в Києві, де понад третина тепломереж вичерпала нормативний термін служби і потребує термінової модернізації.

Основними чинниками, що спричиняють погіршення технічного стану трубопроводів, є корозія, недостатній рівень теплоізоляції, вплив ґрунтових вод, а також нестабільні теплові та гідравлічні режими експлуатації. Це призводить до появи аварійних ситуацій, значних втрат теплоносія і зниження енергоефективності систем теплозабезпечення.

У сучасних умовах необхідно розробити методики оцінки залишкового ресурсу теплових мереж із урахуванням реальних експлуатаційних факторів, таких як напружено-деформований стан трубопроводів, температурні та тискові навантаження, а також вплив ремонтно-відновлювальних заходів. Наявність достовірної

інформації про технічний стан і залишковий ресурс трубопроводів дозволить не лише прогнозувати їхню подальшу експлуатацію, а й приймати обґрунтовані рішення щодо реконструкції та оптимізації теплоізоляції.

Вирішення цих питань є актуальним для підвищення надійності теплопостачання, зменшення теплових втрат і зниження витрат на ремонтно-відновлювальні роботи, що має важливе соціально-економічне значення для регіонів з централізованою системою теплопостачання..

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка ефективності функціонування теплових мереж, а також методи їх вдосконалення та модернізації, є предметом активних наукових досліджень в умовах зростаючого попиту на енергозбереження, зменшення теплових втрат і цифровізацію енергетичних систем. За останні 15 років сформувалася широка база теоретичних і прикладних напрацювань як в Україні, так і за кордоном, що охоплюють питання системного аналізу, теплогідравлічного моделювання, впровадження SCADA-систем, а також використання відновлюваних джерел у централізованому теплопостачанні.

Так у роботі Дірка Мюллера (D. Müller), Беатріче Настазі (B. Nastasi) та ін. представлено структурний аналіз німецьких теплових мереж з позицій сталого розвитку. Автори розглядають централізовані мережі як частину ширшої енергетичної екосистеми, в якій важливо забезпечити не лише передачу тепла, а й інтеграцію з системами охолодження, акумулювання енергії та гнучкого регулювання попиту [1, с. 665]. Системний підхід дозволяє враховувати складну взаємодію між джерелами тепла, споживачами та допоміжними об’єктами, що особливо актуально для розгалужених мереж у містах з багатоповерховою забудовою.

У шведських джерелах, зокрема у роботі Свен Вернер (S. Werner), системний аналіз поєднується з історичним підходом: розглянуто трансформацію теплових мереж від другої до четвертої генерації з акцентом на енергоефективність, цифрову керованість і мінімізацію втрат [2, с. 420]. Автор вказує на доцільність переходу до низькотемпературного теплопостачання з гнучкою інфраструктурою, що дозволяє інтегрувати поновлювані джерела енергії.

Питання критеріїв ефективності розглядаються у роботі Петтера Лауенбурга (P. Lauenburg) та Фредріка Вернстедта (F. Wernstedt), де запропоновано використання машинного навчання для прогнозування теплових навантажень і адаптивного керування подачею тепла [3, с. 1338]. Це дозволяє оптимізувати роботу джерел тепла, знижувати втрати та забезпечувати стабільні параметри теплоносія. Автори акцентують на точності даних про споживання, необхідності врахування категорій споживачів і впровадженні систем розумного управління.

В українській науковій практиці увагу привертають дослідження, у яких аналізується технічний стан вітчизняних тепломереж. У праці Маслія Ю.М. та колег здійснено класифікацію теплових мереж за ступенем зносу та ефективністю. Запропоновано критерії для оцінки – рівень тепловтрат, втрати теплоносія, стабільність тиску та температури, а також економічна доцільність реконструкції [4, с. 28].

У роботі Хонгвей Фан (H. Fang) та ін. досліджено моделювання теплових режимів у мережах з урахуванням втрат, зміни температури теплоносія та динаміки навантаження [5, с. 592]. Автори поєднують аналітичні й чисельні методи, зокрема метод скінченних об’ємів, і вказують на необхідність врахування реальних даних споживання для точного прогнозування поведінки мережі.

Актуальність математичного моделювання в українських реаліях висвітлюється у публікації Мельниченка І. О., де представлено алгоритми розрахунку гідравлічних режимів у складних розгалужених системах з багатьма джерелами та споживачами [6, с. 56]. Модель дозволяє враховувати змінні режими роботи, аварійні ситуації та реконфігурацію мереж. Особлива увага приділяється питанням збіжності та валідації результатів моделювання.

У монографії Свенд Фредеріксен (S. Frederiksen) та Свен Вернер (S. Werner) описано впровадження SCADA-систем у системи централізованого теплопостачання [7, с. 153]. Акцент зроблено на можливостях автоматизованого управління, виявлення витоків, зниження втрат і покращення реакції системи на зміну навантаження. Також підкреслюється важливість телеметрії для адаптивного регулювання у реальному часі.

Застосування геоінформаційних технологій у моделюванні тепломереж представлено у публікації Зайченка В. І. і Коваленка В. Г. [10, с. 47]. Зазначено, що інтеграція ГІС з аналітичними модулями дозволяє просторово візуалізувати режим роботи мережі, оцінювати ризики пошкодження окремих ділянок і планувати реконструкцію з урахуванням топології.

У публікації Генріка Лунда (H. Lund) та ін. обґрунтовано концепцію четвертого покоління централізованого теплопостачання (4GDH), що базується на використанні низькотемпературного теплоносія (40–60°C), відновлюваних джерел, теплових акумуляторів і цифрових систем управління [8, с. 4]. Автори відзначають, що такі мережі є ключовими для досягнення кліматичних цілей і декарбонізації сектору опалення.

Лю Сяобін (Liu X.) та співавт. розглядають практичні аспекти інтеграції відновлюваних джерел у структуру тепломереж: сонячні колектори, біомаса, теплонасоси. В роботі проаналізовано приклади гібридних систем з централізованою та локальною генерацією тепла, що дозволяють оптимізувати навантаження і підвищити гнучкість мережі [9, с. 2638].

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, присвячених аналізу ефективності функціонування теплових мереж, теплогідравлічному моделюванню та впровадженню цифрових технологій, проблема оцінки залишкового ресурсу трубопроводів теплових мереж залишається недостатньо висвітленою. Існуючі роботи переважно зосереджуються на оптимізації теплових режимів або підвищенні енергоефективності, тоді як питання точного визначення технічного стану, напружено-деформованого стану та прогнозування ресурсу експлуатації окремих елементів мережі потребують подальшого глибокого вивчення. Враховуючи значну зношеність трубопроводів і їх критичну роль у забезпеченні надійності теплопостачання, дослідження ресурсних характеристик цих елементів є надзвичайно актуальним і доцільним напрямом наукової роботи.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз технічного стану трубопроводів теплових мереж на прикладі реальних експлуатаційних умов, а також обґрунтування підходів до оцінки їх залишкового ресурсу з урахуванням теплогідравлічних режимів, напружено-деформованого стану, температурно-технологічних навантажень і впливу ремонтних втручань. Запропоновані підходи спрямовані на підвищення ефективності функціонування тепломереж та забезпечення їх надійної і безпечної експлуатації в умовах обмежених ресурсів і високого рівня зношеності.

Виклад основного матеріалу. Стан систем централізованого теплопостачання в більшості українських міст, зокрема у місті Києві, є критичним. Більше третини трубопроводів працюють понад нормативний термін експлуатації, а значна частина магістральних і розподільчих мереж перебуває в аварійному або передаварійному стані. За даними відкритих джерел, загальна протяжність теплових мереж, які вичерпали свій ресурс, у столиці перевищує 36% від усієї довжини, що підтверджується фактичними обсягами аварійних ремонтів і реконструкції мереж у місті Києві [11–13]. Така ситуація призводить до значних втрат теплової енергії при транспортуванні теплоносія, частих аварій, непрогнозованих відключень споживачів та перевитрат енергоресурсів, що напряму впливає як на надійність теплопостачання, так і на економіку підприємств теплокомуненерго.

У місті Києві зафіксовано низку характерних особливостей, що додатково ускладнюють експлуатацію тепломереж. Зокрема, близько 47 км трубопроводів прокладено в умовах підвищеного впливу ґрунтових вод, що призводить до погіршення стану теплоізоляції, корозії сталевих елементів і втрати несучої здатності. Ще понад 20 км тепломереж розміщені під будівлями, що значно ускладнює доступ до них для проведення ремонту або заміни. У таких умовах перед будь-яким втручанням у структуру мережі доцільним є проведення попереднього об’єктивного оцінювання технічного стану труб, що дозволяє виявити пріоритетні зони для ремонту й обґрунтовано розподілити ресурси на реконструкцію.

Актуальність такого підходу підтверджується також тим, що втрати теплової енергії в окремих ділянках тепломереж можуть сягати понад 20% загального обсягу відпущеного тепла. У результаті цього підприємства теплокомуненерго змушені постійно підвищувати тиск та температуру теплоносія, щоб компенсувати втрати, що, своєю чергою, прискорює процеси зносу елементів мережі. Виникає замкнене коло: чим більший знос – тим вищі втрати, чим вищі втрати – тим вища інтенсивність зносу. Розірвати це коло можливо лише за умови системного підходу до моніторингу технічного стану трубопроводів та стратегічного планування реконструкції.

Крім того, в сучасних умовах значна увага приділяється питанням енергоефективності та скорочення викидів парникових газів. Неефективні мережі не лише є джерелом енергетичних втрат, а й спричиняють непряме зростання викидів CO_2 внаслідок перевитрати палива на виробництво додаткової теплової енергії. Відповідно, реконструкція тепломереж на основі достовірної інформації про їхній стан сприяє досягненню як технічних, так і екологічних цілей.

У нормативних документах України, таких як ДБН В.2.5-39:2008 та «Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж», передбачено необхідність регулярного технічного обстеження трубопроводів. Однак на практиці ці вимоги часто ігноруються або виконуються формально, без використання сучасних методів діагностики. Наявність об'єктивних діагностичних даних та інженерних моделей дозволяє прогнозувати поведінку трубопроводів у часі, що є основою для прийняття зважених рішень щодо ремонту, часткової чи повної заміни труб, зміни режимів роботи мережі.

Додатковим чинником, який підтверджує доцільність комплексного дослідження технічного стану, є обмеженість бюджетних коштів, що виділяються на реконструкцію. Часто місцеві бюджети можуть дозволити собі лише часткове оновлення мереж, тому важливо мати інструментарій, який дозволяє визначити пріоритетні ділянки з найвищим рівнем ризику відмови або втрат. Такий підхід забезпечує раціональне використання ресурсів і дозволяє досягти максимального ефекту від інвестицій у модернізацію інфраструктури.

У цьому контексті особливого значення набувають методи інженерної діагностики та математичного моделювання, що враховують теплогідравлічні режими, напружено-деформований стан труб, історію навантажень, термічні впливи та корозійне середовище. Поєднання польових обстежень з чисельними розрахунками дозволяє здійснити кількісну оцінку залишкового ресурсу трубопроводів, виявити ділянки з підвищеним ступенем пошкодження, а також сформувати техніко-економічне обґрунтування реконструкції.

У дослідженні ефективності функціонування теплових мереж використано комплексний підхід, що охоплює методи напружено-деформованого аналізу трубопроводів, теплогідравлічного моделювання, а також методи прогнозування залишкового ресурсу та втрат тепла в умовах реальної експлуатації [14, с. 193].

Для оцінки міцності елементів трубопроводів тепломереж використано підхід на основі теорії пружності та рівнянь механіки суцільного середовища. Основним рівнянням, що описує напружено-деформований стан (НДС) в умовах плоского осесиметричного навантаження, є рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r = 0$$

де σ_r – радіальне напруження, σ_θ – тангенціальне (оболонкове) напруження, f_r – об'ємна сила в радіальному напрямку.

При цьому деформаційний стан описується за допомогою рівнянь сумісності та закону Гука з урахуванням термічної складової:

$$\varepsilon = \frac{1}{E}(\sigma - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)) + \alpha \Delta T,$$

де E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона, α – коефіцієнт теплового розширення, ΔT – зміна температури.

Для моделювання розподілу температур і тисків у трубопроводах теплових мереж використано систему рівнянь енергетичного та гідродинамічного балансу (нерозривності, Нав'є–Стокса для стаціонарного потоку та енергії з урахуванням теплових втрат відповідно):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{\upsilon}) = 0,$$

$$\rho(\vec{\upsilon} \cdot \nabla)\vec{\upsilon} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{\upsilon} + \rho \vec{g},$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\upsilon} \cdot \nabla T\right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q,$$

де ρ – густина, $\vec{\upsilon}$ – вектор швидкості потоку, p – тиск, μ – динамічна в'язкість, c_p – теплоємність, λ – коефіцієнт теплопровідності, q – об'ємне джерело тепла.

Оцінка втрат тепла з трубопроводів проводиться на основі спрощеного рівняння теплопередачі через циліндричну стінку з урахуванням теплоізоляції:

$$Q = \frac{2\pi L (T_{вн} - T_{зовн})}{\frac{\delta}{\lambda_{ізол}} + \frac{1}{\alpha_{зовн}}},$$

де Q – теплові втрати, L – довжина трубопроводу, $T_{вн}$, $T_{зовн}$ – температура всередині труби та зовні відповідно, δ – товщина теплоізоляції, $\lambda_{ізол}$ – теплопровідність теплоізоляційного матеріалу, $\alpha_{зовн}$ – коефіцієнт тепловіддачі до навколишнього середовища.

Особливу увагу приділено врахуванню експлуатаційних факторів, які істотно впливають на залишковий ресурс труб і загальну надійність системи. До таких факторів належать: залишкові напруження, корозійне зношення стінки, нерівномірне температурне поле та циклічні коливання тиску. Всі ці чинники інтегруються у розрахункову модель як додаткові вихідні параметри.

Залишкові напруження, які виникають у трубопроводах після зварювальних або термічних операцій, вводяться до загального поля

напружень як початкове навантаження. У чисельному моделюванні це реалізується шляхом накладання напружено-деформованого стану попереднього завантаження на основне навантаження від тиску та температури. Таким чином, повне напруження в елементі труби записується як:

$$\sigma_{заг} = \sigma_{експл} + \sigma_{зал}.$$

Корозійне зношення стінки трубопроводу враховується через зміну геометричних параметрів у моделі. Фактична товщина стінки визначається як різниця між початковим значенням і втратами через корозію:

$$t_{еф} = t_0 - \Delta t_{кор}.$$

Це безпосередньо впливає на величину розрахункових напружень, які зростають, зазвичай, обернено пропорційно товщині стінки.

Нерівномірний розподіл температури у товщі труби та по довжині магістралі викликає локальні деформації, що призводять до появи термічних напружень. У моделі це враховується шляхом накладання температурного поля $T(r, z)$, отриманого або з теплового розрахунку, або з експлуатаційних вимірювань. Відповідна термічна деформація розраховується за формулою:

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot (T - T_0),$$

де α – коефіцієнт теплового розширення матеріалу труби.

Циклічні зміни тиску в системі зумовлюють розвиток втомних пошкоджень металу труби. Для кількісного опису втомного зносу застосовується гіпотеза накопичення пошкодження Пальмгрена–Майнера:

$$D = \sum_{i=1}^{n} \frac{n_i}{N_i},$$

де n_i – кількість циклів певної амплітуди тиску, N_i – граничне число циклів до руйнування при цій амплітуді. Коли D ≥ 1, ресурс вважається вичерпаним. Визначення N_i здійснюється за S–N кривими для сталі труби, з урахуванням робочої температури.

Для практичної реалізації запропонованого підходу до оцінки технічного стану трубопроводів теплових мереж було обрано характерну ділянку трубопроводу номінальним діаметром Ду100, що містить запірну арматуру та коліна, які є зонами підвищеної концентрації напружень та найбільш ймовірного розвитку дефектів (рис. 1). Така конфігурація вибрана з огляду на її поширеність у розподільчих мережах теплопостачання міського типу та високу чутливість до змін режимів експлуатації.

У розрахунках були враховані реальні температурні графіки, що застосовуються під час опалювального сезону в місті Києві, зокрема температури подаючого та зворотного трубопроводів у різні періоди доби та при різних температурах зовнішнього повітря (рис. 2). Тобто було змодельовано змінні теплові навантаження, характерні для роботи системи в реальних умовах. Крім того, до уваги було взято циклічний характер роботи системи, що включає зміну тиску та температури в залежності від споживчого навантаження, що є критичним чинником при оцінці втомного зносу та залишкового ресурсу трубопроводу.

У рамках дослідження було змодельовано процес руху теплоносія по вибраній ділянці теплової мережі, яка складається з трубопроводу Ду100, запірної арматури та чотирьох колін (№ 1–4). Для моделі на основі температурного графіку сформовано граничні умови, що дозволило виконати деталізований аналіз теплового стану окремих елементів.

За результатами моделювання встановлено, що температура теплоносія в зоні запірної арматури змінюється в межах від 105°C до 90°C, тоді як

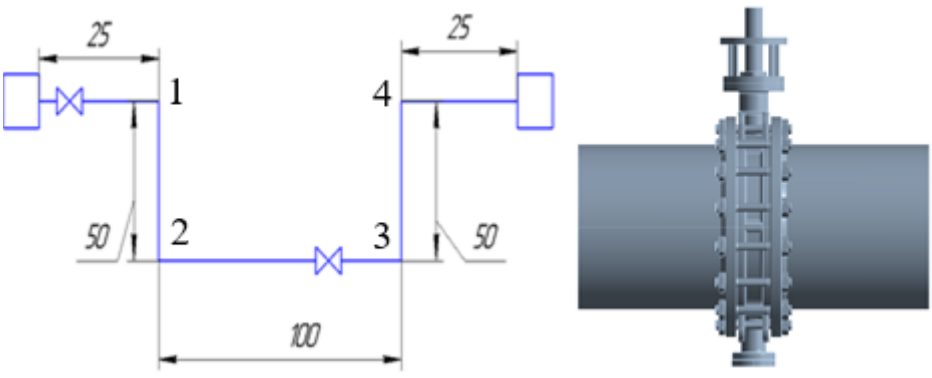


Рис. 1. Трубопровід з колінами та запірною арматурою

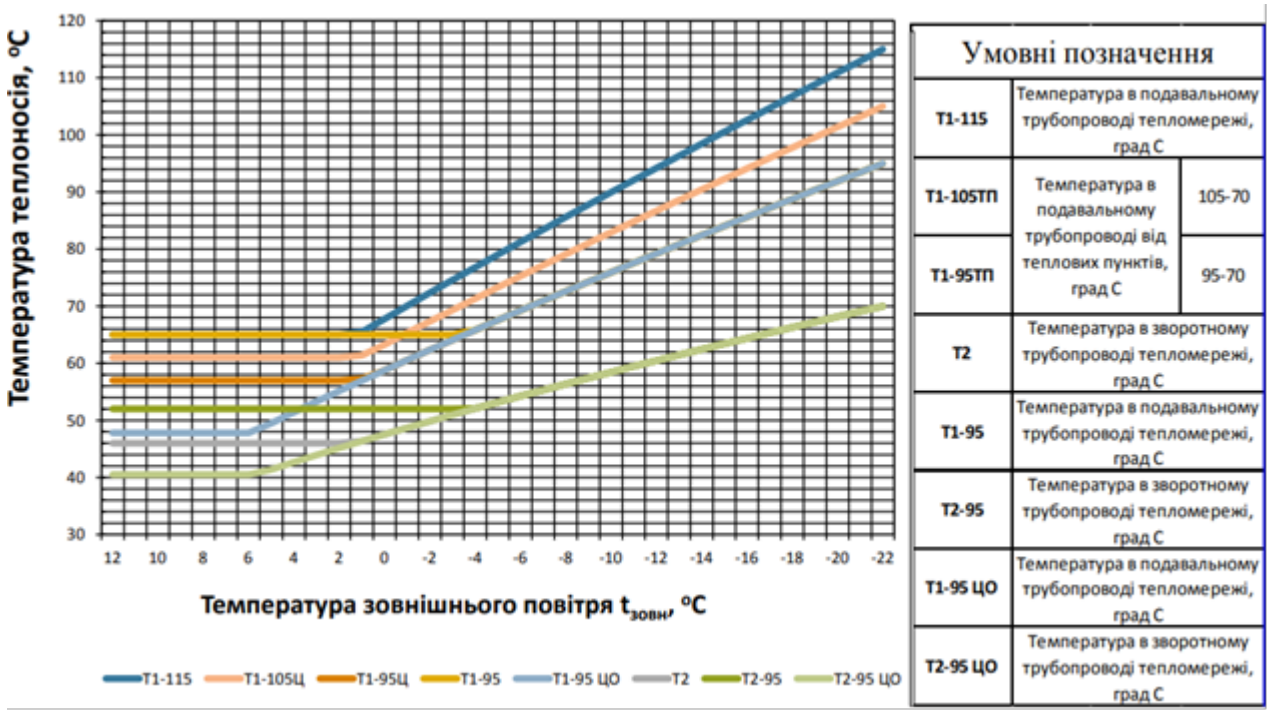


Рис. 2. Температурний графік м. Київ на опалювальний період

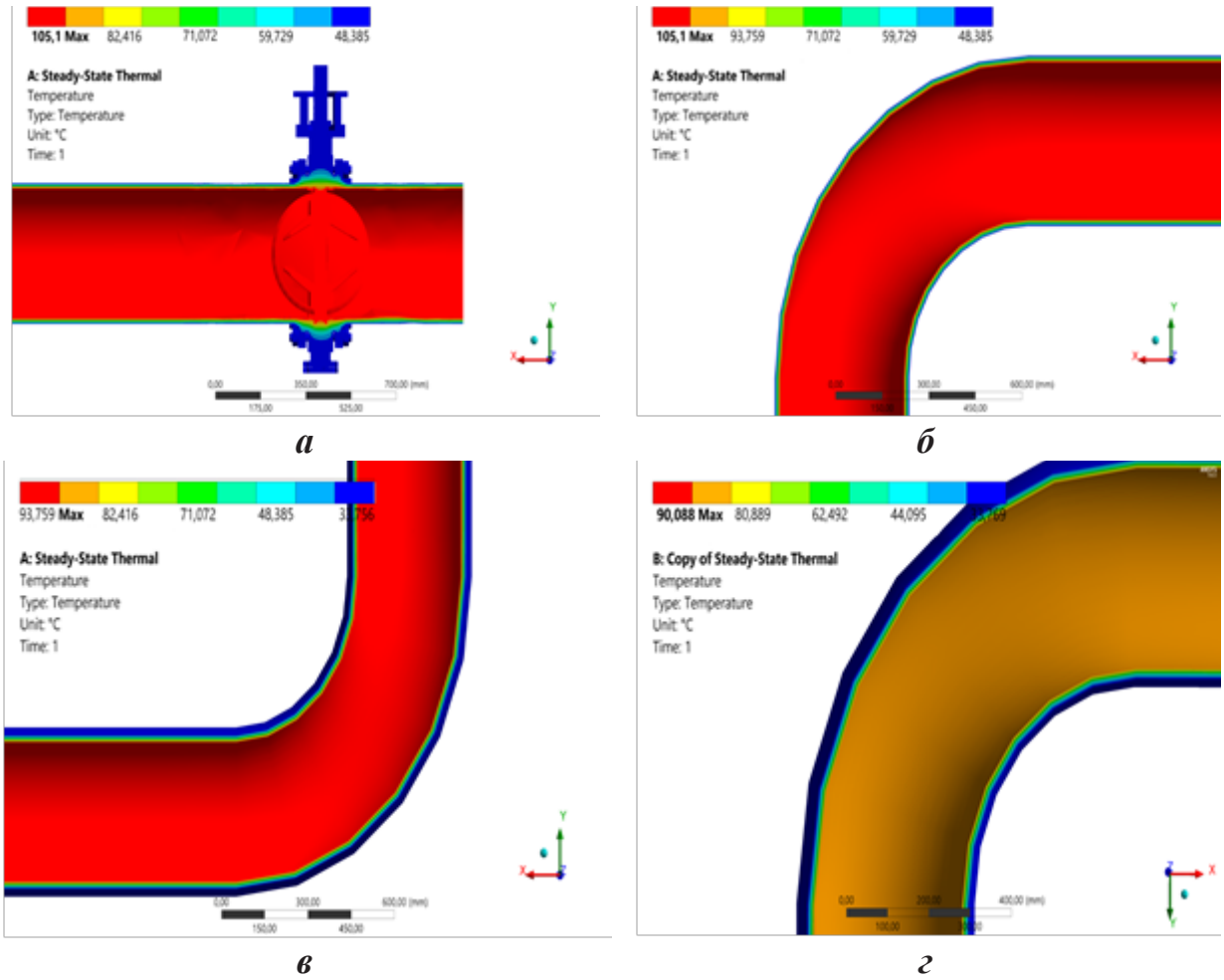
температура на зовнішній поверхні ручок арматури не перевищує 48°С (рис. 3а). В зоні коліна № 1 температура з внутрішньої сторони складає від 105°С до 90°С, а з зовнішньої – від 70°С до 50°С (рис. 3б). Коліно № 3 має внутрішню температуру від 90°С до 80°С та зовнішню – від 54°С до 34°С (рис. 3в). Коліно № 4 характеризується дещо нижчими температурами: від 85°С до 80°С з внутрішньої сторони та від 44°С до 35°С – із зовнішньої (рис. 3г). Таке локальне охолодження зовнішніх поверхонь труб та арматури свідчить про значні теплові втрати в окремих зонах і вказує на потенційні ділянки для додаткового утеплення або реконструкції.

Використавши дані теплового стану було проведено дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів вибраної ділянки трубопроводу з урахуванням реальних геометричних особливостей вузлів. Результати моделювання показали, що в зоні запірної арматури Ду100 еквівалентні напруження знаходяться в межах від 1,39 МПа до 7 МПа, причому максимальні значення зосереджуються в області засувки – до 8,5 МПа (рис. 4а). Значне підвищення напружень також зафіксовано в зонах геометричних переходів і вигинів трубопроводу: у коліні № 1 напруження сягають 8,9 МПа, у коліні № 3 – 8,8 МПа, а в зоні коліна № 4 – до 8,6 МПа (рис. 4б – 4г).

Зосередження напружень у згаданих ділянках свідчить про підвищену втомну чутливість і ризики утворення мікротріщин при тривалому експлуатаційному навантаженні, що підтверджує доцільність посиленої діагностики саме цих зон перед прийняттям рішень про реконструкцію або продовження ресурсу.

На основі описаної вище методики, що враховує допустиму кількість циклів до утворення тріщин та рівень кумулятивного пошкодження під час експлуатації трубопроводу, проведено оцінку залишкового ресурсу з урахуванням параметрів зростання тріщин. Розрахунок охоплював теплові та механічні навантаження, характерні для реальних режимів роботи теплових мереж (враховано вплив температурних графіків типу 150/120°С та 105/75°С), що відповідають режимам пуску і роботи в опалювальний період. Результати моделювання дозволили визначити ступінь пошкодженості металу в характерних зонах трубопроводу та оцінити індивідуальний залишковий ресурс для кожної ділянки. Узагальнені дані представлено в таблиці 1.

Пояснення до позначень у таблиці:
де t – температура експлуатації трубопроводу, °С; σ_{max} – максимальне еквівалентне напруження в трубопроводі, МПа; $\sigma_{0.2}^{в}$ – умовна межа текучості матеріалу труби, МПа; $n_т$ – запас міцності за напруженням (відношення межі текучості до максимального напруження); N_i – допустиме число циклів пуску до появи пошкоджень для відповідного температурного графіка; n_i – кількість виконаних циклів пуску певного типу; $[П_ц]$ – циклічна пошкоджуваність металу (кумулятивне



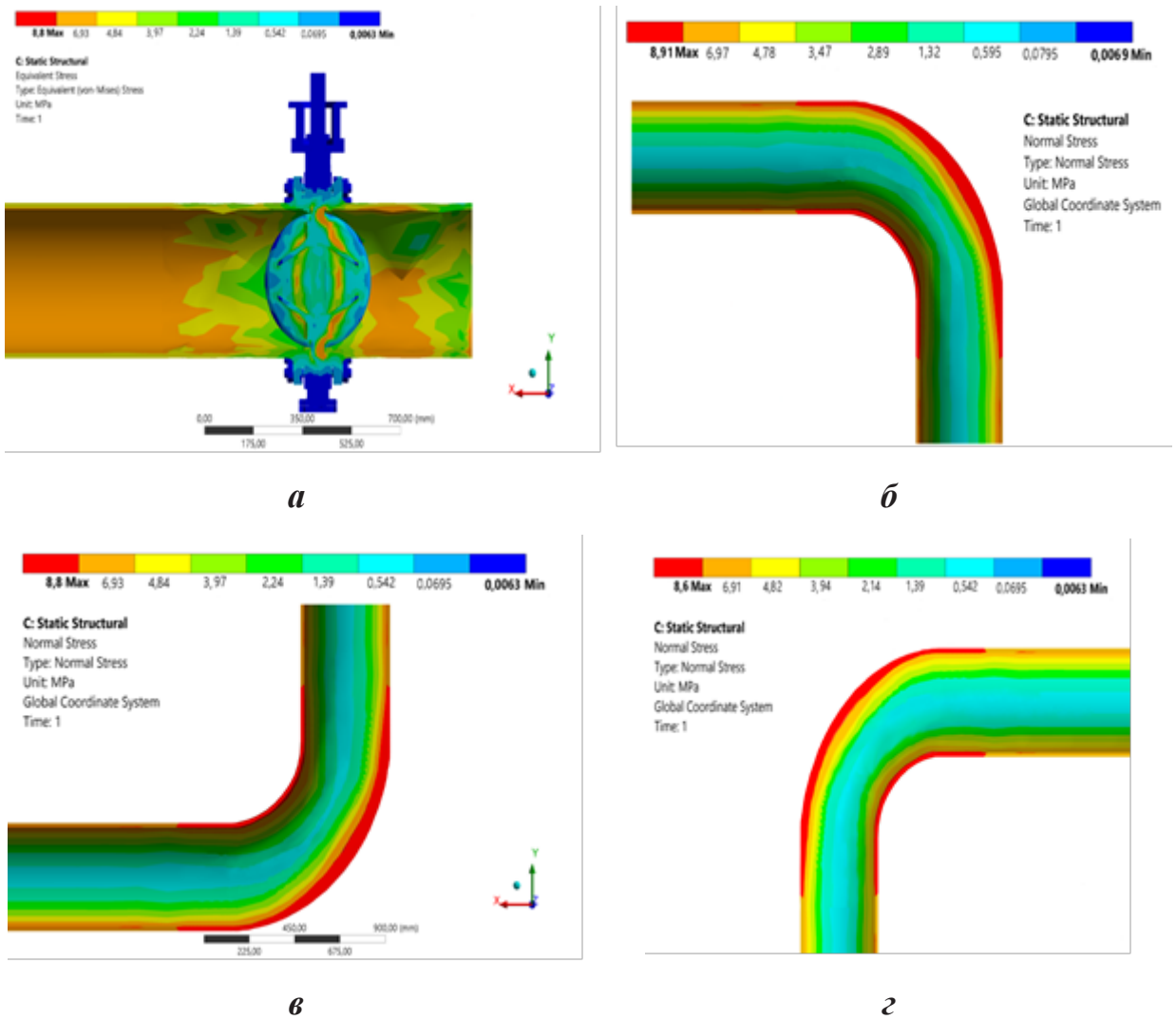
а *б* *в* *г*

Рис. 3. Тепловий стан елементів трубопроводу: а – ділянка теплової мережі з запірною арматурою, б – коліно № 1, в – коліно № 3, г – коліно № 4

Таблиця 1

Розрахункова оцінка пошкоджуваності, залишкового напрацювання та індивідуального ресурсу трубопроводу

Найменування	Формула	Значення
Температура	t,°C	105
Інтенсивність напружень	σімах,, МПа	8,9
Межа текучості	σ02в, МПа	230
Запас міцності по σімах	nт= σ02в / σімах	27,3
Допустиме число циклів по різним типам пусків	Ni 150/120	800
	Ni 105/75	1200
Циклічна пошкоджуваність	[Пц]=∑ ni/[Ni]	0,414
Статична пошкоджуваність	[Пст]=∑ tj/[tj]	0,37
Допустимий час роботи металу	[tj]	3,5×105
Число годин роботи в рік	τгод = T/z	4320
Річна циклічна пошкоджуваність	[Пр»]=∑ npi/ [Ni]	0,0138
Річна статична пошкоджуваність	[Пст»]=∑ τгод /[tpl]	0,0123
Сумарна пошкоджуваність за рік	[Пр»] = [Пст»] + [Пц»]	0,0261
Залишкове напрацювання в роках	G = 1-[П´]/[Пр»], год	8,27
Індивідуальний залишковий ресурс	Тзал= G× τгод, час	35 726



а *б*

в *г*

Рис. 4. Напружено-деформований стан елементів трубопроводу:
а – ділянка теплової мережі з запірною арматурою, б - коліно № 1, в - коліно № 3, г - коліно № 4

пошкодження від пусків); t_j – фактичний напрацьований час експлуатації трубопроводу при певному температурному режимі, год; $[t_j]$ – допустимий час експлуатації металу (визначається за допомогою діаграми тривалої міцності матеріалу) до втрати працездатності при певному температурному режимі, год; $[П_{ст}]$ – статична пошкоджуваність металу (за тривалістю експлуатації); $\tau_{год}$ – кількість годин роботи трубопроводу за рік, год/рік; n_{pi} – кількість пусків за рік відповідного типу; $[П_ц'']$ – річна циклічна пошкоджуваність; $[П_{ст}'']$ – річна статична пошкоджуваність; $[П_р'']$ – сумарна річна пошкоджуваність (циклічна + статична); [П′] – накопичене пошкодження станом на момент оцінки; G – залишкове напрацювання трубопроводу, років; $T_{зал}$ – індивідуальний залишковий ресурс трубопроводу, год.

Таким чином, розрахунковий ресурс дослідженої ділянки трубопроводу теплових мереж м. Київ вичерпаний на 78,4%. Індивідуальний залишковий ресурс становить 35 726 год.

Висновки. У статті представлено комплексний підхід до оцінки технічного стану трубопроводів теплових мереж із урахуванням реальних експлуатаційних умов, зокрема температурних навантажень, циклічності пусків, напружено-деформованого стану та процесів поступового зростання пошкоджень. На основі розробленої математичної моделі здійснено чисельне моделювання теплового та механічного стану характерної ділянки трубопроводу Ду100 з колінами й запірною арматурою, типових для міських тепломереж.

Виконані розрахунки температурних полів дозволили виявити зони найбільших теплових втрат, що вказує на необхідність локального посилення теплоізоляції. Аналіз напружено-деформованого стану виявив

концентрацію напружень у вузлових елементах, зокрема в колінах та арматурі, де напруження досягають 8,5–8,9 МПа. Це свідчить про підвищену втомну чутливість цих зон.

Оцінка залишкового ресурсу металу трубопроводу засвідчила, що при дотриманні чинного температурного графіка 105/75°С залишковий ресурс становить близько 35 726 годин або понад 8 років, що свідчить про придатність до подальшої експлуатації без негайної заміни. Водночас спрощені методи розрахунку демонструють суттєво нижчі значення ресурсу, що підкреслює необхідність застосування комплексних інженерних підходів для точного прогнозування технічного стану.

Запропонована методика може бути використана для ранжування ділянок тепломереж за критичністю їхнього технічного стану, планування ремонтів і реконструкції, а також оптимізації ресурсного використання в умовах обмеженого фінансування. Результати дослідження мають практичне значення для підприємств теплокомуненерго та органів місцевого самоврядування, які відповідають за сталу роботу систем централізованого теплопостачання.

Список літератури:

1. Müller D., Nastasi B., Vigna I., Wetter M. System analysis of district heating networks in Germany. Energy. 2019. Vol. 180. C. 665–678.
2. Werner S. District heating and cooling in Sweden. Energy. 2017. Vol. 126. C. 419–429.
3. Lauenburg P., Wernstedt F. Adaptive control of district heating systems using machine learning and demand forecasts. Applied Energy. 2016. Vol. 162. C. 1337–1345.
4. Маслій Ю.М., Бутко С.М., Саломатін О.В. Аналіз технічного стану систем теплопостачання в Україні. Теплоенергетика. 2021. № 2. С. 26–32.
5. Fang H., Xia J., Jiang Y., Zhang X., Li Y. Key issues and solutions in district heating development. Energy. 2015. Vol. 86. C. 589–602.
6. Мельниченко І.О. Математичне моделювання гідравлічних режимів у теплових мережах з розгалуженою структурою. Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Теплоенергетика. 2018. № 1. С. 54–61.
7. Frederiksen S., Werner S. District heating and cooling. Lund: Studentlitteratur, 2013. 675 c.
8. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V. 4th generation district heating (4GDH). Energy. 2018. Vol. 68. C. 1–11.
9. Liu X., Wang C., Wang Q. Integration of renewable energy into district heating systems: A review of technology and policy. Renewable Energy. 2020. Vol. 147. C. 2633–2645.
10. Зайченко В.І., Коваленко В.Г. Використання ГІС-технологій для оптимізації структури теплових мереж. Енергетика та автоматика. 2020. № 3. С. 45–50.
11. Київтеплоенерго замінило 70 км найбільш зношених тепломереж та усунуло понад 6 тисяч аварій. Офіційний портал Київської міської державної адміністрації. 2019. URL: https://surli.cc/ruoxfn (дата звернення: 27.05.2025).
12. У Києві на трьох об'єктах розпочата реконструкція тепломереж. КП «Київтеплоенерго». 2021. URL: https://surl.lu/zgchar (дата звернення: 27.05.2025).
13. КП «Київтеплоенерго» замінить майже 14 км найбільш зношених тепломереж на Троєщині. Офіційний портал Київської міської державної адміністрації. 2023. URL: https://surli.cc/essiie (дата звернення: 27.05.2025).
14. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Визначення напружено-деформованого стану стопорно-регулюючого клапана АЕС з урахуванням газодинаміки робочого тіла. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Т. 33 (72), № 5. С. 193–198. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/28

Chernousenko O.Yu., Rindyuk D.V., Zatyrka O.I. RESOURCE CHARACTERISTICS OF HEATING NETWORK PIPELINES

The article presents a scientifically grounded approach to assessing the technical condition of district heating pipelines, based on the modeling of thermal and stress–strain states, as well as the evaluation of residual life under real operating conditions. The methodology takes into account the effects of residual stresses, corrosion-induced wall thinning, non-uniform temperature distribution, and cyclic loading. As an example of model application, a pipeline section with a nominal diameter of DN100, including elbows and shut-off valves, was investigated. A temperature field was constructed, and critical zones of heat loss were identified. Stress analysis revealed concentrations in areas of geometric transitions and fittings, where values reached 8.5–8.9 MPa. The residual life was calculated by determining both the cyclic and static damage accumulation in the pipeline material, enabling the evaluation of the individual remaining service life. Under the 105/75°C

operating regime, the residual life exceeded 35,000 hours (8.27 years). The proposed approach makes it possible to identify the most vulnerable segments of the network and improves the justification for management decisions regarding the reconstruction and modernization of heating systems. The results can be used by district heating utilities for strategic planning of maintenance and repair operations based on the actual technical condition of the network. Implementation of the proposed measures will contribute to improving the energy efficiency of thermal systems and reducing operational costs. It is demonstrated that targeted diagnostics of the technical condition of heating pipelines is a necessary prerequisite for enhancing the reliability, efficiency, and safety of centralized heat supply. This approach enables a transition from reactive maintenance strategies to proactive lifecycle management of thermal infrastructure elements, which is particularly important under current energy challenges and resource constraints.

Key words: *district heating network, pipeline residual life, stress–strain analysis, thermal losses, cyclic damage, technical condition assessment, thermal-hydraulic modeling, corrosion wear, reconstruction planning.*

УДК 621.039.58:504.06
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/24

Шелешей Т.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гончаренко М.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ: ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ

У роботі розглядається актуальна проблема інтеграції екосистемних послуг у процес оцінки впливу енергетичних технологій на навколишнє середовище. Зростання глобальних викликів, пов'язаних із кліматичними змінами та деградацією природних систем, вимагає перегляду традиційних підходів до енергетичної політики, орієнтованих не лише на зниження викидів парникових газів, а й на збереження біорізноманіття та забезпечення сталого природокористування. В роботі обґрунтовується необхідність застосування концепції екосистемних послуг як інструменту комплексного аналізу взаємодії енергетичних систем із довкіллям.

Проаналізовано сучасний стан досліджень у сфері екологічної оцінки енергетичних технологій, зокрема використання життєвого циклу (LCA) та класифікації екосистемних послуг (CICES). Визначено ключові обмеження існуючих методик, зокрема недостатню кількісну оцінку повного спектру екосистемних послуг, слабку інтеграцію результатів в енергетичне планування та відсутність міждисциплінарної взаємодії.

Запропоновано системний підхід на основі концепції IPBES, що дозволяє враховувати не лише біофізичні індикатори, але й соціальні, економічні та просторові аспекти впливу енергетики на природу і суспільство. Особлива увага приділена необхідності оцінки впливу на регіональні екосистеми з урахуванням життєвого циклу енергетичних технологій та просторової неоднорідності.

Розглянуто екологічні наслідки використання традиційних джерел енергії – вугілля, нафти і природного газу, що зумовлюють значні негативні ефекти на якість повітря, водних ресурсів, ґрунтів і здоров'я населення. Підкреслено важливість переходу на більш чисті, відновлювані джерела енергії з урахуванням балансу між кліматичними перевагами та локальними екосистемними ризиками.

Дослідження спрямоване на розробку методології комплексної оцінки впливу енергетичних систем на екосистемні послуги, що сприятиме формуванню збалансованої та стійкої енергетичної політики, здатної забезпечити енергетичну безпеку, збереження біорізноманіття та покращення якості життя населення.

Ключові слова: *екосистемні послуги, енергетична політика, IPBES, сталий розвиток, біопаливо, викиди, життєвий цикл.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючої екологічної нестабільності питання енергетичної безпеки набуває принципово нового значення. Зростання глобальної обізнаності щодо впливу енергетики на зміну клімату та деградацію довкілля актуалізує потребу перегляду традиційних підходів до енергетичної політики та запровадження екологічно орієнтованих стратегій розвитку.

Глобальні тенденції декарбонізації визначають вектор трансформації енергетичних систем у напрямку зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та розширення використання відновлюваних джерел енергії. У цьому контексті Україна, як відповідальний учасник міжнародного кліматичного процесу, формує власну модель енергетичного переходу. Згідно з Енергетичною стратегією України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», передбачається скорочення частки вугілля в загальному обсязі споживання первинних енергоресурсів з 30,3% (у 2015 р.) до 12,5% (у 2035 р.), що цілком узгоджується з міжнародною практикою декарбонізації.

Проте реалізація стратегій енергетичного переходу вимагає не лише технологічної

модернізації та економічної ефективності, а й врахування екологічних та соціальних наслідків, пов'язаних із трансформацією енергетичних систем. Одним із ключових підходів до комплексної оцінки таких наслідків є концепція екосистемних послуг, яка передбачає розгляд природи як джерела життєво важливих благ та функцій для суспільства. Інтеграція екосистемних послуг в енергетичну політику дозволяє виявити приховані екологічні витрати, оптимізувати використання природних ресурсів і сприяти формуванню більш збалансованих та стійких енергетичних рішень.

Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності розробки інструментів оцінки впливу енергетичних технологій на екосистемні послуги, що дозволить поєднати завдання декарбонізації з цілями збереження біорізноманіття, стійкого природокористування та підвищення якості життя населення.

Сучасна енергетика постає перед подвійним викликом: необхідністю забезпечення надійного енергопостачання та одночасного зниження негативного впливу на довкілля. Традиційні джерела енергії, зокрема викопне паливо, є основним чинником зміни клімату, забруднення атмосферного повітря, деградації екосистем і втрати біорізноманіття. У той же час глобальні кліматичні ініціативи, як-от Паризька угода, передбачають швидкий перехід до низьковуглецевої економіки, що створює потребу у переосмисленні пріоритетів енергетичної політики.

Попри зростаючу увагу до відновлюваних джерел енергії, оцінювання їх впливу часто обмежується суто технічними та економічними показниками, ігноруючи просторово-екологічний контекст. У результаті рішення щодо впровадження нових енергетичних технологій нерідко супроводжуються новими ризиками – погіршенням якості середовища, конфліктами із місцевими громадами або нераціональним використанням ресурсів.

У цьому контексті актуальним є впровадження підходу, який дозволяє оцінити взаємодію енергетичних систем із природним середовищем не лише через показники викидів, а й через призму екосистемних послуг – тобто тих вигод, які суспільство отримує від функціонування екосистем. Такий підхід забезпечує інтегроване бачення енергетичних рішень, у якому враховано як екологічні, так і соціальні аспекти.

Проблема полягає у відсутності усталеної наукової методики, яка дозволила б повноцінно включити екосистемні послуги до процесу планування, проєктування та оцінки енергетичних систем. Це створює розрив між сучасними знаннями про вразливість довкілля та практикою прийняття рішень у сфері енергетики.

Таким чином, постановка проблеми безпосередньо пов'язана з вирішенням низки важливих наукових завдань, таких як розробка методів оцінювання впливу енергетичних технологій на екосистемні послуги, а також практичних завдань, включаючи підготовку рекомендацій для інтеграції цих оцінок у державну політику, інженерне проєктування та корпоративне планування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу енергетичних систем на навколишнє середовище та екосистеми є предметом міждисциплінарних досліджень у сфері екології, енергетичного моделювання, економіки природокористування та кліматичної політики.

Однією з ключових теоретичних засад у сучасній екологічній науці є концепція екосистемних послуг, яка була закладена у звіті Millennium Ecosystem Assessment (2005) [1]. У ньому вперше систематизовано поняття постачальницьких, регулюючих, культурних і підтримувальних послуг, які є основою для формування нових підходів до оцінки впливу господарської діяльності, зокрема енергетики.

Подальший розвиток цієї ідеї відбувався в рамках проекту TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), який наголосив на важливості врахування економічної цінності екосистемних послуг при ухваленні політичних та бізнес-рішень [2]. Практичне застосування цієї концепції зумовило потребу в створенні уніфікованих класифікацій, зокрема CICES (Common International Classification of Ecosystem Services), яка використовується у рамках Статистичної комісії ООН [3].

У контексті енергетики особливої ваги набувають дослідження, що поєднують оцінку життєвого циклу (LCA) енергетичних технологій з аналізом їхнього впливу на довкілля. Наприклад, у роботі Е.Г. Гертвіча (E.G. Hertwich). (2015) [4] порівнюються різні джерела енергії за їхнім екологічним «слідом», включаючи вплив на біорізноманіття, використання земель, води та ресурсів.

Водночас Х.Е. Елісон (H.E. Allison) (2014) [5] порушив важливу проблему суперечностей між глобальними цілями декарбонізації та локальними екологічними впливами, що мають місце під час впровадження відновлювальної

енергетики. У статті доводиться необхідність врахування компромісів між довгостроковими кліматичними перевагами та короткостроковими ризиками для екосистем.

Вагомий внесок у теоретичну базу досліджень забезпечила Міжурядова платформа з біорізноманіття та екосистемних послуг (IPBES), яка пропонує системну рамку аналізу взаємозв'язків між природою та соціально-економічними системами [6]. Цей підхід дозволяє враховувати прямі та непрямі фактори впливу енергетичних рішень, включаючи політичні, інституційні та просторові аспекти.

Нарешті, в роботі А.М. Буле (A.-M. Boulay). (2018) [7] пропонується інтегрувати екосистемні послуги у методології оцінки життєвого циклу, зокрема через включення показників водного стресу, змін землекористування та деградації середовища, що є важливим для аналізу відновлювальних джерел енергії.

Попри значний поступ, залишається низка невирішених аспектів:

• відсутність методологій для комплексної кількісної оцінки впливу енергетичних систем на повний спектр екосистемних послуг;

• недостатня інтеграція результатів таких оцінок у стратегічне енергетичне планування;

• нестача регіонально-орієнтованих досліджень для локальних екосистем;

• слабка міждисциплінарна взаємодія між екологами, інженерами, енергетиками та політиками.

Дослідження, представлене в цій статті, спрямоване на подолання зазначених обмежень через адаптацію концепції екосистемних послуг до потреб енергетичного планування з урахуванням життєвого циклу технологій, просторових впливів і соціальних чинників.

Постановка завдання. Метою статті є розробка комплексного підходу до оцінки впливу енергетичних технологій на екосистемні послуги з урахуванням життєвого циклу технологій, просторової неоднорідності та соціальних аспектів, що дозволить інтегрувати екологічні, економічні та соціальні фактори в процес планування і реалізації енергетичної політики для забезпечення сталого розвитку і збереження біорізноманіття.

Виклад основного матеріалу. Сучасне бачення взаємозв'язків між природою та суспільством значною мірою ґрунтується на системному підході, запропонованому Міжурядовою науково-політичною платформою з біорізноманіття та екосистемних послуг (IPBES). Концептуальна структура IPBES розглядає природу як взаємопов'язану сукупність природних процесів, функцій і благ, які підтримують життя людини через систему так званих екосистемних послуг.

Цей підхід поєднує елементи екології, соціальної науки та політики і передбачає аналіз таких ключових складових:

• Природа (біофізичне середовище, екосистеми та біорізноманіття),

• Природоорієнтовані вигоди (екосистемні послуги),

• Якість життя людини,

• Прямі чинники змін (наприклад, зміна землекористування, забруднення, зміна клімату),

• Непрямі чинники (економічні, соціальні, технологічні або політичні драйвери),

• Антропогенні активи (інфраструктура, знання, інституції тощо).

У контексті енергетичної політики така структура дозволяє поєднати технічні аспекти виробництва енергії з більш широким розумінням її соціально-екологічних наслідків. IPBES формалізує причинно-наслідкові зв'язки, що виникають між енергетичними системами та природним середовищем, і надає можливість кількісного й якісного оцінювання змін у наданні екосистемних послуг під впливом впровадження нових технологій.

Застосування цієї моделі до аналізу енергетичних стратегій відкриває нові можливості для:

• інтеграції екосистемних показників у процес планування енергетики;

• врахування непрямих соціально-економічних наслідків рішень, зокрема впливу на вразливі громади та добробут населення;

• розробки більш стійких сценаріїв розвитку енергетики, які узгоджуються з цілями збереження біорізноманіття та адаптації до кліматичних змін.

Таким чином, концепція IPBES формує методологічне підґрунтя для системного аналізу енергетичної політики, який виходить за межі оцінки викидів парникових газів і дозволяє враховувати весь спектр взаємодій між технологіями, суспільством і природним середовищем.

Оцінювання впливу енергетичних технологій традиційно ґрунтується на аналізі окремих біофізичних індикаторів, таких як викиди парникових газів (зокрема CO_2), кислотне навантаження, фотохімічне окислення та евтрофікація. Ці показники дозволяють зіставити різні енергетичні джерела за їхнім впливом на зміну клімату та

інші глобальні екологічні процеси. Однак такий підхід є неповним, оскільки не враховує просторово-часовий контекст, регіональні екосистемні особливості та соціальну вразливість територій, де впроваджуються енергетичні проєкти.

Важливим обмеженням є також відсутність повного охоплення життєвого циклу енергетичних систем. Більшість оцінок фокусується на стадії експлуатації (виробництво електроенергії), тоді як впливи, що виникають на інших етапах – видобуток сировини, транспортування, будівництво, демонтаж та утилізація – залишаються поза увагою. Наприклад, видобуток рідкоземельних металів для виробництва сонячних панелей або турбін часто має значний локальний екологічний слід, який не враховується в національних енергетичних розрахунках.

Більш комплексне уявлення про вплив енергетичних технологій на природу надає підхід, що базується на екосистемних послугах. На відміну від суто біофізичних оцінок, цей підхід враховує вигоди, які екосистеми надають людині, включаючи:

- регулюючі послуги (очищення повітря і води, регуляція клімату, запобігання ерозії);
- постачальницькі послуги (біомаса, питна вода, матеріали);
- культурні послуги (рекреація, естетична цінність, духовні зв'язки з природою);
- підтримувальні послуги (плодючість ґрунтів, кругообіг поживних речовин, опилення).

Застосування такої системної оцінки потребує інтеграції просторових даних, зокрема ГІС-аналізу, та розгляду просторової неоднорідності впливів, адже екосистемна вразливість різниться залежно від регіону. Крім того, врахування часової динаміки (наприклад, ефекти, які проявляються через роки після завершення експлуатації) є критичним для формування довгострокових рішень.

Отже, для повноцінної оцінки впливу енергетичних систем необхідна методологія, яка поєднує:

- життєвий цикл технологій (LCA);
- класифікацію екосистемних послуг (наприклад, за CICES);
- просторовий та соціальний аналіз;
- індикатори стійкості природного середовища.

Такий підхід дозволить створити багатовимірну оцінку, яка не лише характеризуватиме ефективність технологій з екологічної точки зору, а й забезпечить основу для прийняття політичних рішень, орієнтованих на сталий розвиток.

Традиційні джерела енергії – вугілля, нафта, природний газ – становлять основу глобального енергетичного балансу, але водночас є основними джерелами негативного антропогенного впливу на довкілля. Їхнє використання супроводжується низкою екологічних ризиків, які проявляються як на глобальному, так і на локальному рівнях.

Спалювання вугілля залишається одним із найбільш забруднюючих процесів серед усіх видів енергетичного виробництва. Викиди діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x), вуглекислого газу (CO_2), ртуті, миш'яку та інших важких металів призводять до: формування кислотних дощів; деградації ґрунтів та водних екосистем; збільшення концентрації твердих частинок у повітрі; значного зростання ризику захворювань дихальної та серцево-судинної систем.

Крім того, вуглецева інтенсивність вугільних ТЕС є найвищою серед усіх технологій – понад 900 г CO_2/кВт·год виробленої електроенергії.

Нафтова промисловість також є джерелом численних екологічних загроз. У процесі видобутку, транспортування та переробки нафти в атмосферу надходять леткі органічні сполуки (ЛОС), сірчисті з'єднання, бензол, ксилен, а також нафтопродукти, що можуть потрапляти до ґрунтів і водних тіл при аваріях та витоках. Ці забруднювачі мають канцерогенні властивості та впливають на ендокринну систему людини.

Природний газ, хоча й вважається «найчистішим» серед викопного палива за рівнем викидів при згорянні, має приховані екологічні загрози, пов'язані з видобутком, зберіганням і транспортуванням. Основну проблему становить витік метану (CH_4) – газу, що має парниковий потенціал у 25–28 разів вищий за CO_2 у 100-річній перспективі. За оцінками МЕА, до 3% усього видобутого метану може витікати в атмосферу, що суттєво нівелює кліматичні переваги використання газу порівняно з вугіллям.

Крім того, викиди твердих частинок (PM10 і PM2.5), озону (O_3) та оксидів азоту під час спалювання викопного палива спричиняють утворення смогів, які: знижують якість повітря в містах і промислових регіонах; погіршують здоров'я людей; сприяють втратам врожаю в аграрних районах через вплив на фотосинтез.

Такі впливи накладаються на екосистемні процеси – зокрема, порушення трофічних ланцюгів, зниження біорізноманіття, деградацію ґрунтів і водних ресурсів.

Висновки. У сучасних умовах, коли екологічні виклики та кліматичні зміни стають все більш гострими, забезпечення енергетичної безпеки потребує комплексного та системного підходу. Трансформація енергетичних систем у напрямку декарбонізації є ключовим завданням, яке має враховувати не лише зниження викидів парникових газів, а й збереження екосистемних послуг, що є основою сталого розвитку і якості життя населення.

Використання традиційних викопних джерел енергії призводить до значних негативних наслідків для навколишнього середовища, включаючи забруднення повітря, деградацію екосистем і втрату біорізноманіття. У цьому контексті інтеграція концепції екосистемних послуг у процес планування та оцінки енергетичних технологій дозволяє більш комплексно врахувати екологічні, соціальні та економічні аспекти енергетичного переходу.

Розробка і впровадження методологій, що поєднують життєвий цикл технологій, просторовий аналіз і соціальні фактори, є необхідною для формування збалансованих, стійких та ефективних енергетичних рішень. Такий підхід сприятиме мінімізації екологічних ризиків, збереженню біорізноманіття та покращенню добробуту суспільства, що відповідає міжнародним кліматичним зобов'язанням і національним стратегіям розвитку України.

Отже, системне врахування екосистемних послуг у енергетичній політиці є важливою передумовою для успішного та екологічно безпечного енергетичного переходу, здатного забезпечити гармонійне співіснування людини і природи.

Список літератури:

1. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005. 137 c.

2. TEEB. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Earthscan, 2010. 401 c.

3. Haines-Young, R., Potschin, M. *Common International Classification of Ecosystem Services* (*CICES*)*: Consultation document*, 2018. 36 p.

4. Hertwich, E. G., et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies // *PNAS*. 2015. Vol. 112, № 20. P. 6277–6282.

5. Allison, H. E., et al. Biodiversity offsets and climate change: An assessment of the effectiveness of mitigation hierarchy / *Conservation Letters*. 2014. Vol. 7, № 4. P. 324–330.

6. IPBES. *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES Secretariat, 2019. 56 p.

7. Boulay, A.-M., et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE) / *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018. Vol. 23, № 3. P. 368–378.

Sheleshei T.V., Honcharenko M.O. IMPACT OF ENERGY SYSTEMS ON ECOSYSTEM SERVICES: CHALLENGES AND STRATEGIC DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT

This paper addresses the urgent issue of integrating ecosystem services into the assessment of the environmental impacts of energy technologies. The growing global challenges related to climate change and the degradation of natural systems require revising traditional approaches to energy policy, focusing not only on reducing greenhouse gas emissions but also on preserving biodiversity and ensuring sustainable natural resource use. The study substantiates the necessity of applying the ecosystem services concept as a tool for comprehensive analysis of the interaction between energy systems and the environment.

The current state of research in environmental assessment of energy technologies is analyzed, particularly the use of life cycle assessment (*LCA*) *and the Common International Classification of Ecosystem Services* (*CICES*)*. Key limitations of existing methodologies are identified, including insufficient quantitative evaluation of the full range of ecosystem services, weak integration of results into energy planning, and lack of interdisciplinary collaboration.*

A systemic approach based on the IPBES framework is proposed, which allows consideration not only of biophysical indicators but also social, economic, and spatial aspects of energy's impact on nature and society. Special attention is given to the need for regional ecosystem impact assessment, accounting for the life cycle of energy technologies and spatial heterogeneity.

Environmental consequences of using conventional energy sources–coal, oil, and natural gas–are discussed, highlighting significant negative effects on air quality, water resources, soils, and public health. The importance of transitioning to cleaner renewable energy sources is emphasized, balancing climate benefits with local ecosystem risks.

The study aims to develop a methodology for comprehensive assessment of energy systems' impacts on ecosystem services, promoting a balanced and sustainable energy policy capable of ensuring energy security, biodiversity conservation, and improved quality of life.

Key words: *ecosystem services, energy policy, IPBES, sustainable development, biofuel, emissions, life cycle assessment.*

УДК 621
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/25

Шпилюр П.С.
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Іваненко Н.П.
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

КЛАСИФІКАЦІЯ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Враховуючи Європейський вектор розвитку України уряд приділяє значну увагу розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій. У 2024 р. уряд України ухвалив цілу низку стратегій і планів, які в тому числі стосуються розвитку відновлюваних джерел енергії. Зокрема у Національному плані енергетики і клімату прогнозується, що частка відновлюваних джерел енергії у структурі загального кінцевого енергоспоживання має становити не менше як 27%, а в загальному виробництві електроенергії на рівні 25% у 2030 році. Згідно з Національним планом дій з відновлюваної енергетики та клімату України до 2030 року частка сонячної енергії в енергосистемі країни може досягти 5–7%. У статті класифіковано чинники, що впливають на собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями залежить від низки факторів, які можна умовно поділити на технічні, економічні, географічні та політичні. Метою статті є класифікація і оцінка чинників, які впливають на продовження строку експлуатації і підвищення ефективності роботи сонячних панелей, а також створення бази даних з техніко-економічними характеристиками відповідного обладнання, обслуговування і заходів. Наведено технічні рішення щодо зменшення впливу негативних чинників: впровадження наноструктурованих покриттів, систем активного охолодження, трекінгових механізмів і алгоритмів предиктивного обслуговування. Окрему увагу приділено вдосконаленню конструкційних та матеріалознавчих компонентів. Зібрано інформацію щодо техніко-економічних характеристик різних видів сонячних панелей і заходів з підвищення економічної ефективності і подовження строку експлуатації і сформовано відповідну базу даних. Ця база буде слугувати основою для економічної оцінки заходів зі зниження собівартості виробництва електроенергії сонячними панелями на основі розрахунку середньозваженої собівартості. Такі оцінки будуть враховувати кліматичні умови регіонів України.

Ключові слова: *сонячні панелі, енергетична ефективність, економічна ефективність, собівартість, строк експлуатації.*

Постановка проблеми. Країни ЄС докладають значних зусиль до протидії зміні клімату на відміну від США, які відкликали свій підпис під Паризькою угодою [1], демонструючи свою зневагу до цих проблем. Згідно з Угодою про асоціацію з ЄС [2] Україна повинна враховувати законодавче і нормативно-правове поле ЄС при плануванні розвитку енергетики у повоєнний час. Наріжним каменем політики ЄС щодо відновлюваної енергетики є Директива ЄС 2023/2413 [3], яка встановила ціль у 42,5% для частки відновлюваної енергії (сонячна енергія, енергія вітру, океану та гідроенергії, біомаса та біопаливо) у кінцевому споживанні енергії в ЄС до 2030 року з метою досягнення 45% у перспективі. Директива сприяє розвитку відновлюваних джерел енергії за допомогою національної підтримки та схем фінансування ЄС, оскільки самі по собі енергетичні ринки не можуть забезпечити бажаний рівень відновлюваних джерел енергії. У 2024 р. уряд України ухвалив цілу низку стратегій і планів [4–6], які в тому числі стосуються розвитку відновлюваних джерел енергії. Зокрема у Національному плані енергетики і клімату [6] прогнозується, що частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі загального кінцевого енергоспоживання має становити не менше як 27%, а в загальному виробництві електроенергії на рівні 25% у 2030 році. Згідно з Національним планом дій з відновлюваної енергетики та клімату України до 2030 року [4] частка сонячної енергії в енергосистемі країни може досягти 5–7%.

У цьому розрізі нагальною є проблема зниження середньозваженої собівартості виробництва електроенергії сонячними панелями,

зокрема терміну їх експлуатації і ефективності функціонування. Ці параметри залежать від багатьох чинників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки значну увагу дослідників привертає використання нових матеріалів для виробництва сонячних панелей. Наприклад, використання TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) дозволяє отримати коефіцієнт корисної дії (ККД) до 24–26% і призводить до меншої деградації (<0,4% на рік) [7]. Монокристалічні панелі HJT (Heterojunction) мають ККД до 26% ККД і висока продуктивність при слабкому освітленні [8]. Використання кремній-перовскітних тандемів дає рекордний ККД 33,9% [9], а перовскітні модулі мають строк служби 25+ років, а ККД > 20% [10]. Багато досліджень також проводяться щодо темпів деградації. Наприклад в [11] встановлено, що сучасні сонячні панелі втрачають 0,3–0,5% ККД на рік (проти 0,8–1% у старих моделях). При цьому більше 90% панелей після 25 років зберігають ≥ 80% початкової потужності [12]. Досліджено вплив високих температур на старіння сонячних панелей [13]. При цьому герметизація EVA-плівок покращила стійкість [14]. Дослідники прогнозують до 2030 р. зростання ККД масових панелей до 30% завдяки тандемам [14], а строку служби більше 40 років для нових матеріалів [15–16]. Автори використовують зарубіжні дослідження, але проблема полягає в адаптації цього досвіду до національних обставин, зокрема економічних і кліматичних умов.

Постановка завдання. Метою статті є класифікація і оцінка чинників, які впливають на подовження строку експлуатації і підвищення ефективності роботи сонячних панелей, а також створення бази даних з техніко-економічними характеристиками відповідного обладнання, обслуговування і заходів.

Виклад основного матеріалу. Собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями залежить від низки факторів, які можна умовно поділити на технічні, економічні, географічні та політичні. Нижче перераховані основні з них.

1) Капітальні витрати (CAPEX)

• Вартість сонячних панелей, інверторів, систем кріплення, кабелів тощо.

• Витрати на будівництво, монтаж та підключення до мережі.

• Зниження цін на фотоелектричні модулі значно зменшило CAPEX.

2) Операційні витрати (OPEX)

• Обслуговування, очищення панелей, страхування, ремонт.

• Витрати на моніторинг та управління системою.

3) Коефіцієнт використання потужності (Capacity Factor)

• Залежить від інсоляції (кількості сонячного випромінювання), яка відрізняється за регіонами. Наприклад, в Україні цей показник становить 12–18%, а в Саудівській Аравії – до 25%.

• Кут нахилу панелей, наявність трекерів для слідкування за сонцем.

4) Ефективність панелей (ККД)

• Монокристалічні панелі (ККД 18–22%) дорожчі, але продуктивніші за полікристалічні (15–18%) або тонкоплівкові (10–13%).

• Деградація панелей (0,5–1% втрат ефективності на рік).

5) Термін служби та амортизація

• Стандартний термін експлуатації – 25–30 років. Чим довше служба, тим нижча собівартість.

6) Фінансові умови

• Відсоткові ставки за кредити, податкові пільги, субсидії (наприклад, «зелені» тарифи).

• У країнах з підтримкою ВДЕ (як Україна планує до 2030 року) собівартість нижча за даними Держенергоефективності України.

7) Масштаб проекту

• Великі сонячні парки мають економію на масштабі: їхня собівартість може бути 30–50 дол. США/МВт·год, тоді як дахові установки – 80–150 дол. США /МВт·год.

8) Вартість землі та інфраструктура

• Наявність підключення до мережі, відстань до підстанцій.

• Витрати на оренду або купівлю землі.

9) Кліматичні умови

• Часті дощі або запиленість знижують продуктивність і збільшують витрати на очищення.

10) Політика та регуляторні заходи

• Запровадження мита на імпорт обладнання (наприклад, у США та ЄС), податки на «сонячний» прибуток.

• Використання локальних виробників (як це робить Китай) знижує собівартість.

Автори зосередилися на тих факторах, що впливають на строк експлуатації та ефективність сонячних панелей, які можна запровадити на стадії проєктування або навіть на стадії експлуатації.

На стадії проєктування наріжним каменем є вибір типу сонячних панелей. Суттєво впливає на ефективність також якість виробництва, тому що дешеві модулі швидше деградують через менш міцні матеріали (наприклад, нижчій клас кремнію, тонший захисний шар). Середнє падіння потужності – 0,5–1% на рік для якісних панелей. Дешеві можуть втрачати до 2% і більше. У табл. 1 наведені деякі техніко-економічні характеристики різних типів сонячних панелей.

Автори сформували базу даних з техніко-економічними характеристиками впровадження різних заходів з підвищення ефективності і подовження строку експлуатації сонячних панелей. При цьому беруться до уваги кліматичні умови України (у регіональному розрізі).

Підвищення ефективності сонячних батарей залежить від оптимізації їх роботи, технічних удосконалень та правильного обслуговування. Ось основні способи:

1) Оптимізація розташування та кута нахилу

• Ідеальний кут: Залежить від широти місцевості та сезону. В Україні для максимальної ефективності панелі часто встановлюють під 30–40°.

• Трекер сонця: Системи, що повертають панелі за сонцем, можуть збільшити виробіток на 20–30%, але дорожчі й потребують обслуговування.

• Відсутність затінення: Навіть часткова тінь (від дерев, труб, антен) різко знижує продуктивність.

2) Покращення технічних параметрів

• Вибір панелей з високим ККД:

• Монокристалічні (до 22–24%) ефективніші за полікристалічні (15–18%).

• PERC-елементи, гетероструктурні (HJT) або tandem-елементи можуть дати +5–10% до ККД.

• Мікроінвертори або оптимізатори потужності: Допомагають уникнути втрат через часткове затінення або різну продуктивність панелей.

• Охолодження: Перегрів знижує ККД. Використовуйте:

• Вентильовані конструкції.

• Пасивні/активні системи охолодження (наприклад, водяне охолодження для великих станцій).

3) Регулярне обслуговування

• Чистка поверхні: Забруднення (пил, пташиний послід) можуть знизити продуктивність на 10–25%.

• В сухих регіонах – очищення кожні 2–3 місяці.

Таблиця 1

Техніко-економічні характеристики різних типів сонячних панелей

№	Тип панелей	Параметри	Значення	Переваги/недоліки
1	Монокристалічні кремнієві панелі (Mono-Si)	ККД Потужність модуля Вартість Площа модуля (550 Вт)	19–23 % 350–700 Вт $0.18–0.25 /Вт ~2.1 м²	високий ККД, довгий термін служби, естетичність/ вища ціна порівняно з полікристалічними
2	Полікристалічні кремнієві панелі (Poly-Si)	ККД Потужність модуля Температурний коефіцієнт Вартість Середня площа модуля (320 Вт)	15–18 % 250–350 Вт –0.40 %/°C $0.14–0.20 /Вт ~1.9 м²	нижча ціна, простіше виробництво/більші втрати при нагріванні, менша ефективність
3	Тонкоплівкові панелі (CdTe, a-Si, CIGS)	ККД Вартість Температурний коефіцієнт Сфера застосування	11–13 % $0.12–0.18 /Вт –0.25 %/°C Промислові станції	гнучкість, добра робота при затіненні, низький темп коефіцієнт/складніший процес виробництва, менша надійність
4	Двосторонні панелі (bifacial Mono-Si)	ККД (фронт) Додаткове вироблення (тил) Потужність модуля Вартість	20–22 % +5–15 % 540–700 Вт $0.23–0.30 /Вт	додаткове вироблення від відбитого світла / вища вартість, потребує спеціального монтажу
5	Перовскітні (експериментальні/ пілотні)	ККД (лабораторний) Вартість Надійність Масштабне виробництво	25–28 % орієнтовно $0.10–0.15 /Вт Ще тестується у 2024–2025 рр.	дуже високий ККД, дешеві матеріали/недосліджений строк служби, проблеми з деградацією

• В дощових зонах – рідше (дощ частково змиває бруд).

• Діагностика: Перевірка кабелів, контактів, інвертора на нагрівання або пошкодження.

4) Використання додаткових технологій

• Дзеркала та світловідбивні матеріали: Збільшують освітленість панелей, але можуть спричинити перегрів.

• Біфакіальні панелі: Виробляють енергію з обох сторін (+10–30% до виходу), якщо встановлені на світловідбиваючій поверхні.

• Системи накопичення (акумулятори): Дозволяють використовувати «надлишкову» енергію ввечері, підвищуючи загальну ефективність системи.

5) Модернізація електроніки

• Якісний інвертор: Втрати в дешевих інверторах можуть сягати 5–10%. Краще вибирати моделі з ККД >98%.

• MPPT-контролери: Оптимізують роботу панелей при різній освітленості.

У таблиці 2 наведена оцінка ефективності деяких технічних рішень щодо зменшення деградації та підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем

Попередньо можна зазначити, що найбільший ефект можуть дати правильний монтаж (кут, відсутність тіні), вибір якісних панелей (монокристал, PERC, біфакіальні), регулярне очищення та обслуговування, використання сучасної електроніки (MPPT, мікроінвертори). Навіть прості заходи (наприклад, чистка панелей) можуть дати +15% до виробництва без значних витрат.

Але для повної оцінки економічної ефективності впровадження різних заходів з підвищення ефективності та/або продовження строку експлуатації сонячних панелей необхідно розрахувати середньозважену собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями з та без впровадження заходів. Після закінчення заповнення бази даних автори планують провести такі розрахунки і виробити рекомендації щодо доцільності впровадження тих чи інших заходів.

Висновки. Враховуючи орієнтованість України на вступ до ЄС, уряд України розробив цілу низку законодавчих і нормативно-правових актів, спрямованих на розвиток відновлюваних джерел енергії. У даному дослідженні автори провели класифікацію чинників, від яких залежить собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями. Була запропонована класифікація заходів, які приводять до підвищення ефективності і подовження строку експлуатації фотоелектричних систем і які можна запровадити на стадії їхнього проєктування і експлуатації. Проведено попередню оцінку для ідентифікації найбільш перспективних таких заходів.

Таблиця 2

Оцінка ефективності технічних рішень щодо зменшення деградації та підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем

№ п/п	Технічне рішення	Очікуваний ефект, %	Довгострокові переваги	Орієнтовні витрати впровадження, $
1	Повітряне охолодження	+2,5…3	Стабілізація температурного режиму, зменшення перегріву	Низькі (10–30/модуль)
2	Охолодження водою	+6,0…6,8	Підвищення потужності в умовах високих температур	Середні (50–100/модуль)
3	Використання фазозмінних матеріалів (PCM)	Нестабільне (залежить від умов)	Зниження пікових температур, зменшення матеріалозносу	Високі (100–150/модуль)
4	MPPT-контролери	+15…25	Підвищення енерговіддачі шляхом динамічної оптимізації	Середні (20–80/панель)
5	Автоматизовані системи очищення	Уникнення втрат до 20	Стабілізація продуктивності, зменшення ручних витрат	Високі (200–500/установка)
6	Прогнозне технічне обслуговування (SCADA, IoT)	Зниження простоїв до 30	Подовження строку служби на 5–10 років	Високі (500–1500/система)
7	Профілактичне технічне обслуговування	Подовження ресурсу на 5–10	Зниження кількості відмов і вартості експлуатації	Середні (50–100/рік/система)
8	Використання стійких матеріалів (антикорозійні сплави, УФ-захисне скло)	Річна деградація ≤ 0,5	Збереження ефективності на рівні > 90 % через 20 років	Високі (індивідуально, залежно від виробника)

Автори сформували базу даних для фіксації техніко-економічних характеристик заходів для підвищення ефективності і подовження строку експлуатації фотоелектричних систем. Після її остаточного заповнення автори планують розрахувати середньозважену собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями з та без впровадження заходів. На основі таких розрахунків буде вироблено рекомендації щодо доцільності впровадження тих чи інших заходів.

Список літератури:

1. Закон України від 14 липня 2016 р. № 1469-VIII «Про ратифікацію Паризької угоди». https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1469-19#Text

2. Закон України від 16 вересня 2014 року № 1678-VII «Про ратифікацію Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони» https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1678-18#n2

3. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. PE/36/2023/REV/2. http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj

4. Розпорядження КМУ від 13 серпня 2024 р. № 761-р «Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання». https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text

5. Постанова КМУ від 30 травня вересня 2024 р. № 483-р «Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках». https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2024-%D1%80#Text.

6. Розпорядження КМУ від 25 червня 2024 р. № 587-р «Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату». https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df

7. Fraunhofer ISE Annual Report 2024/25. https://www.ise.fraunhofer.de/en/information-material.html

8. Офіційний сайт LONGi. https://www.longi.com/eu/

9. Bodea, G.O., Botto, J.M., Ferreiro, M.E. et al. LINE-1 retrotransposons contribute to mouse PV interneuron development. Nat Neurosci 27, 1274–1284 (2024). https://doi.org/10.1038/s41593-024-01650-2

10. Severin N. Habisreutinger, Matthew O. Reese, Building perovskite solar cells that last.Science 377, 265–266 (2022). DOI:10.1126/science.abq7013

11. NREL's photovoltaic research. https://www.nrel.gov/pv/

12. V.K. Budama, J.P. Rincon Duarte, M. Roeb, C. Sattler. Potential of solar thermochemical water-splitting cycles: A review Solar Energy, 249 (2023), P. 353-366, 10.1016/j.solener.2022.11.001

13. NREL, "Annual degradation rates of photovoltaic systems", NREL Technical Report, 2023. [Online]. Available: https://www.nrel.gov/pv/

14. ITRPV, "International Technology Roadmap for Photovoltaics", ITRPV Working Group, 2024. [Online]. Available: https://www.itrpv.net

15. ITRPV, 2024. International Technology Roadmap for Photovoltaics (13th ed.). Frankfurt: VDMA. https://www.itrpv.net.

16. Ihor Buratynskyi, Tetiana Nechaieva, Sergii Shulzhenko, Nataliia Ivanenko. The Optimization of PV-plant's DC/AC Equipment Ratio Using the Non-linear Least-cost Model. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). https://ieeexplore.ieee.org/document/9575720

Shpyliur P.S., Ivanenko N.P. CLASSIFICATION OF FACTORS THAT AFFECT THE INCREASE IN EFFICIENCY AND EXTENSION OF THE SERVICE LIFE OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS

Taking into account the European vector of development of Ukraine, the government pays significant attention to the development of renewable energy sources, in particular solar power plants. In 2024, the government of Ukraine adopted several strategies and plans, including those related to the development of renewable energy sources. In particular, the National Energy and Climate Plan predicts that the share of renewable energy sources in the structure of total final energy consumption should be at least 27%, and in total electricity production at the level of 25% in 2030. According to the National Action Plan for Renewable Energy and Climate of Ukraine, by 2030 the share of solar energy in the country's energy system may reach 5–7%. The article classifies the factors that affect the cost of electricity production by solar panels, which depends on several factors that can be conditionally divided into technical, economic, geographical and political. The purpose of the article is to classify and assess the factors that affect the extension of the service life and increase the efficiency of solar panels, as well as to create a database with the technical and economic characteristics of the relevant equipment, maintenance and measures. Technical solutions

are presented to reduce the impact of negative factors: the introduction of nanostructured coatings, active cooling systems, tracking mechanisms and predictive maintenance algorithms. Special attention is paid to the improvement of structural and materials components. Information on the technical and economic characteristics of various types of solar panels and measures to increase economic efficiency and extend the service life has been collected and a corresponding database has been formed. This database will serve as the basis for the economic assessment of measures to reduce the cost of electricity production by solar panels based on the calculation of the weighted average cost. Such assessments will take into account the climatic conditions of the regions of Ukraine.

Key words: *solar panels, energy efficiency, economic efficiency, cost, service life.*

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.23
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/26

Єфімова В.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Смірнов Ю.О.
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
Національної академії наук України

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАКЦІЙНОЇ КАМЕРИ

В роботі показано, що в процесі розливання сталі через проміжні ковші МБРЗ необхідно зменшувати вміст неметалевих включень. Показано, що конструкція проміжного ковша суттєво впливає на якість готової продукції, а саме на вміст і розподіл неметалвих включень у готовому продукті.

Аналіз літературних джерел довів, що вміст неметалевих включень необхідно контролювати перед розливанням готового продукту.

Показано зміно вільної енергії системи при видаленні неметалевої частинки. Встановлено, що хімічні потенціали та поверхневий натяг металу практично не змінюються при виході неметалевих включень на поверхню розплаву.

Встановлено, що металургійні суспензії та емульсії без хімічних процесів, розчинення та зміни умов адсорбції у процесі спливання на межу розділу фаз метал – газ є нестійкими дисперсними системами, т.к. зміна енергії Гіббса завжди негативна.

Показано, що для неметалевих включень у сталі основним механізмом укрупнення є ортокінетична коагуляція, що протікає за наявності градієнта швидкості у напрямку поперек потоку.

Визначено, що швидкість руху неметалевих частинок залежить від структури адсорбційного шару. Наявність дифузійної будови адсорбційного прикордонного шару призводить до ковзання, що проявляється у порушенні законів гідродинаміки.

Встановлено рівняння для визначення резидентного часу перебування частинки неметалевого включення у ванні проміжного ковша. Показано, що для збільшення резидентного часу необхідно збільшувати об'єм проміжного ковша і збільшувати розміри вихорів, де потоки можуть мати незначні швидкості, достатні для здійснення необхідної тривалості контакту з шлаком включення.

Проведено фізичне моделювання на холодній моделі процесів рафінування металу у проміжному ковші, що обладнаний перегородками та продувкою інертним газом через фурму великої довжини.

Дослідження на фізичній моделі показало, що, ванна проміжного ковша з гідродинамічної точки зору повинна бути гасителем швидкості потоків, що створюється вимушеною конвекцією.

Визначено, що довжина проміжного ковша визначається довжиною роздавальної камери. Вона залежить від конструкції перегородок, а також кутів нахилу переточних каналів.

У процесі моделювання найкращі результати показали конструкції реакційних камер, що складаються з двох суцільних перегородок із щілинними каналами у днища ковша. Така конструкція забезпечувала створення спрямованого потоку рідини, що утворює дві вихрові гідродинамічні циркуляційні структури. Одна з них утворювалася у реакційній камері, а інша – у роздавальній.

Модельні експерименти показали, що така конструкція проміжного ковша забезпечує збільшення часу перебування імітаторів неметалевих включень у 4–6 разів більше, ніж це має місце за існуючої конструкції проміжного ковша.

Доведено ефективність застосування реакційних камер у ванні проміжного ковша у поєднанні з продувкою металу інертним газом у виробничих умовах.

Промислові експерименти та металографічні дослідження показали, що спостерігається зниження вмісту неметалевих включень на 30–40%.

Ключові слова: *неметалеві включення, проміжний ківш, роздавальна камера, безперервне розливання сталі, металографічні дослідження.*

Постановка проблеми. В даний час, у всьому світі частка сталі, що розливається на машинах безперервного лиття заготовок, збільшується, при цьому особлива увага приділяється питанням підвищення якості безперервнолитих заготовок, що забезпечується технологією процесу та обладнанням машин безперервного лиття заготовок (МНЛЗ). Важливим технологічним вузлом сучасної МНЛЗ є проміжний ківш, його конструкція значно впливає на якість продукції [1]. В даний час проміжний ківш розглядається як універсальний агрегат для додаткового рафінування сталі, усереднення металу за хімічним складом і температурою. Оснащення ковшів спеціальними пристроями, що рафінують, дозволяють оптимізувати гомогенізацію металевого розплаву і створити сприятливі умови для його рафінування, оскільки на цій стадії представляється, по суті, остання технологічна можливість помітно вплинути на якість сталі [2–4].

Однак, як показує практика, при цьому недооцінюється вплив термодинамічних та кінетичних аспектів видалення неметалевих включень у проміжному ковші та можливості підвищення цієї технологічної операції на прикладі сталі К – 60 [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними наукових досліджень [1–4] показано, що вміст неметалевих включень необхідно контролювати перед розливанням готового продукту. Так, у роботах [2–4] показано, що під час лиття можна пригнітити кристалізацію включень і замість крихкого утворити пластичне склоподібне включення, що значно менш шкідливо для готового продукту. В роботах [3–5] показано, що хімічний склад та форма включень можуть бути використані для контролю мікроструктури сталі шляхом подрібнення зерна під час кристалізації або фазових перетворень у твердому стані.

Постановка завдання. На відміну від ізотермічних умов, досліджень, які було проведено раніше, формування неметалевих включень під час лиття є більш складним, оскільки відбувається зміна як температури, так і хімічного складу розплаву. При цьому передбачити зміну включення під час розливання важко, оскільки в термодинаміці оксидів і сульфідів бракує термодинамічних даних для температур металургійних систем. Отже визначення термодинамічних та кінетичних закономірностей процесів модифікування включень є актуальною задачею.

Метою наших досліджень було:

1) з використанням термодинамічного аналізу встановити найкращі умови видалення неметалевих включень з проміжного ковша;

2) для підтвердження теоретичного аналізу провести фізичне моделювання на холодній моделі;

3) перевірити результати досліджень у промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Видалення однорідної неметалевої частинки, що не стискається на поверхню сталі без хімічних процесів, розчинення і без урахування впливу стінок агрегату можна представити зміною ізобарно ізотермічного потенціалу. Оскільки маса металу велика в порівнянні з масою неметалевих включень, приймаємо, що хімічні потенціали та поверхневий натяг металу практично не змінюються при виході продуктів розкислення на поверхню [6]:

$$\Delta G = \sigma^{(в-г)} - \sigma^{(в-м)} - \sigma^{(м-г)} \frac{1+\cos\theta^{(в-м)}}{2} + \frac{\sigma^{(м-г)}\delta A^{(м-г)}}{A_2^{(в-г)}} \quad (1)$$

де $\sigma^{(в-г)}, \sigma^{(в-м)}, \sigma^{(м-г)}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз включення – газ, включення – метал та метал – газ, відповідно $мДж/м^2$; $\theta^{(в-м)}$ – крайовий кут змочування на межі поділу фаз включення – метал; $A^{(м-г)}, A^{(в-г)}$ – площа границі поділу фаз метал – газ та включення – газ, відповідно, $м^2$. Зміна енергії Гіббса у таких системах завжди негативна.

Включення, що утворилися в сталі, можуть укрупнюватися завдяки коагуляції неметалевих включень, за рахунок зменшення поверхні, а отже, вільної енергії [7–8]:

$$-dG = \sigma^{в-м} \cdot d\omega \quad (2)$$

де $d\omega$ – зміна поверхні в процесі коагуляції. Тому цей процес протікає спонтанно.

Для неметалевих включень у сталі основним механізмом укрупнення є ортокінетична коагуляція, що протікає за наявності градієнта швидкості у напрямку поперек потоку.

Видалення з металу утворених включень зводиться до їхнього переміщення в об'ємі металу і залежить від їх розмірів, густини, в'язкості металу і описується приблизно рівнянням, виведеним із закону Стокса. Відповідно до закону Стокса опір руху сферичного тіла в рідині, обумовлений в'язкістю останньої [6].

Швидкість руху неметалевих частинок залежить від структури адсорбційного шару. Наявність дифузійної будови адсорбційного прикордонного шару призводить до ковзання, що проявляється у порушенні законів гідродинаміки. Це [7] відповідно до Б. В. Дерягіну призводить до дифузіофоретичного руху частинок за наявності в середовищі градієнта хімічного потенціалу поверхнево-активної речовини.

Така різниця поверхневого натягу викликає додаткові зусилля, що діє на включення, що рухається. Величина цього зусилля чисельно дорівнює різниці капілярних тисків у хвостовій і лобовій частинах включення, що рухається [9], тобто.

$$f_A = P_{\sigma,л} - P_{\sigma,x}$$
$$f_A = \frac{2\sigma_л}{\Gamma} - \frac{2\sigma_x}{\Gamma} = \frac{2}{\Gamma}\Delta\sigma \qquad (3)$$

де $P_{\sigma,л}, P_{\sigma,x}$ – кпілярний тиск відповідно передньої та задньої частини включення, *Па*; *Г* – надлишок розчиненої речовини у поверхневому шарі, моль·см$^{-2}$; $\sigma_л, \sigma_x$ – поверхневих натяг частин неметалевих включень, мДж·м$^{-2}$; $\Delta\sigma$ – зменшення поверхневого натягу, що викликано адсорбцією, мДж·м$^{-2}$.

Звідси значення швидкості спливання із сталі включення сферичної форми:

$$U_A = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_м - \rho_в}{\eta} + \frac{1}{3}\frac{\Delta\sigma}{\pi r^2} \qquad (4)$$

З урахуванням викладеного, швидкість спливання включень у сталі також має дещо перевищувати розраховану за рівнянням Стокса.

Виходячи з розглянутих теоретичних принципів можна зробити наступний висновок, що рушійним фактором видалення неметалевих включень у практичних умовах є укрупнення частинок за рахунок ортокінетичної коагуляції з одночасною подачею до шлакового покриву, де вони асимілюються шлаком.

За даними [10, 11] інтенсифікації цих процесів сприяє збільшення резидентного часу, що визначається наступною залежністю:

$$\tau = \left(-0,38 + 8,64\alpha - 44\alpha^2 + 67,18\alpha^3\right)\cdot\beta^{-0,61}\Phi^{3,04}\cdot Fr^{-0,08}$$

де $\alpha = \frac{W}{L}$; $\beta = \frac{H}{L}$; $\Phi = \frac{l}{L}$; L, W, H – довжина, ширина та висота проміжного ковша відповідно, *м*; *l* – відстань від випускного стакану, *м*; *Fr* – число Фруда.

Рівняння (5) показує, що для збільшення резидентного часу необхідно збільшувати об'єм проміжного ковша і збільшувати розміри вихорів, де потоки можуть мати незначні швидкості, достатні для здійснення необхідної тривалості контакту з шлаком включення.

Таким чином, ванна проміжного ковша з гідродинамічної точки зору повинна бути гасителем швидкості потоків, що створюється вимушеною конвекцією.

Довжина проміжного ковша визначається довжиною камери роздавання. Вона залежить від конструкції перегородок, а також кутів нахилу переточних каналів.

Ґрунтуючись на зазначених вище теоретичних принципах, з метою збільшення резидентного часу перебування неметалічних включень у ванні проміжного ковша, нами було проведено фізичне моделювання гідродинамічних потоків у роздавальній камері, що застосовується на ПАТ «Укрстальконструкція» у масштабі 1:3 та автомодельності за числом Рейнольдса [10].

У якості робочої рідини, що моделює рідку сталь, використовували воду при температурі 18–25°С, оскільки значення в'язкості води і стали в області температур позапечної обробки досить близькі один до одного. Як індикатори гідродинамічних потоків використовували кульки полістиролу густиною 0,9–1,1 г/см^3. Витрата газу, становив 0,1–0,6 л/хв, а води 1,43 · 10 – 3 м^3/хв. Процеси перемішування, що спостерігалися, фіксувалися за допомогою цифрової відеокамери. Підсвічені точковим джерелом світла індикатори відбивали світло і ставали видимими на темному тлі. Це дозволяло візуально спостерігати виразну картину їхнього перерозподілу. При цьому в ході експериментів виконували оцінку траєкторії руху частинок у рідкій ванні проміжного ковша.

Моделюванням встановлено, що з погляду видалення з рідкої сталі неметалевих включень у проміжних ківшах найбільш ефективною є вихороподібна структура, що забезпечує створення умов для коагуляції та видалення неметалевої фази.

Візуальними критеріями тієї чи іншої гідродинамічної системи з погляду видалення неметалевих включень були: кути розташування каналів у перегородці; розміри зони вихроутворення.

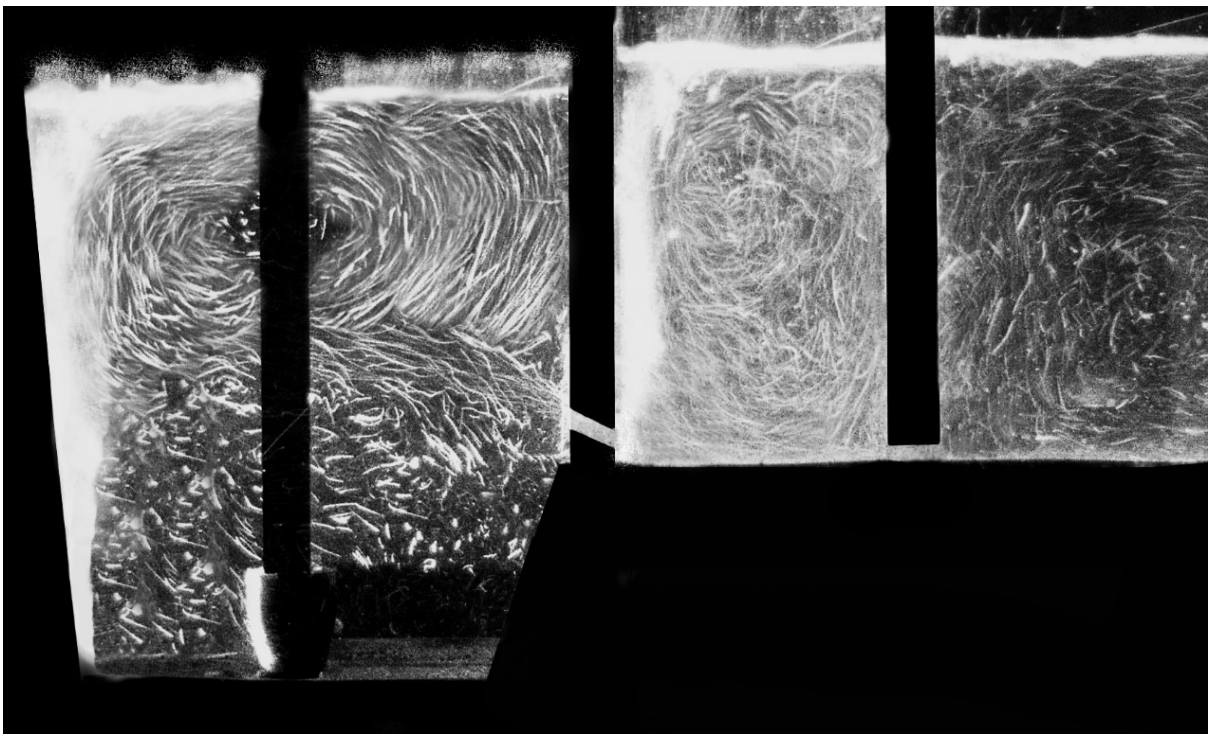


Рис. 1. Схема розповсюдження потоків при втсановленні додаткової перегородки у поєднанні з продуванням металу через багатоканальну фурму великої протяжності

Модельні експерименти показали, що найкращих результатів можна досягти, якщо проміжний ківш буде обладнаний додатковою реакційною камерою. При цьому гідродинаміка проміжної ємності забезпечувала наявність ефективних вихороподібних структур, як у реакційній, так і роздатковій камері, що у свою чергу збільшувало резидентний час перебування індикаторів неметалевих включень за рахунок їх затримки додаткової реакційної камери.

Продувна фурма розташовувалась усередині камери біля перегородки з боку роздавальної камери. Така конструкція забезпечувала створення спрямованого потоку рідини, що утворює дві вихрові гідродинамічні циркуляційні структури. Одна з них утворювалася у реакційній камері, а інша – у роздавальній (рис. 1). Модельні експерименти показали, що така конструкція проміжного ковша забезпечує збільшення часу перебування імітаторів неметалевих включень у 4–6 разів більше, ніж це має місце за існуючої конструкції проміжного ковша.

Метою промислових випробувань було підтвердження ефективності рафінування проміжних ковшів, обладнаних реакційними камерами. При проведенні промислових випробувань одна з перегородок була дослідною інша порівняльною. Порівняльна перегородка була обладнана трьома рядами каналів з різними кутами нахилу, що використовується в даний час. Оцінку ефективності роботи тієї чи іншої схеми розташування каналів у перегородці проводили шляхом порівняння ступеня забрудненості металу неметалевими включеннями. Вміст неметалевих включень по пробах, відібраних із кристалізаторів дослідного і порівняльного рівчаків, визначали металографічним методом Л.

За результатами проведених досліджень забрудненості металу неметалевими включеннями (табл. 1) слід відзначити високий рівень ефективності розробленої технології, що свідчать зниження вмісті неметалевих включень загалом на 30–40%.

Висновки. В результаті проведених досліджень теоретично встановлені умови збільшення резидентного часу перебування частинок неметалевих включень у ванні проміжного ковша. Фізичне моделювання довело, що найкращі умови для створення вихороподібної структури спостерігаються при встановленні додаткової перегородки та утворення реакційної камери. Промислові випробування довели, що ефективність використання реакційної камери у поєднанні з продувкою металу інертним газом. Ефективність видалення неметалевих включень становила 30–40%.

Таблиця 1

Забрудненість металу дослідного та порівняльного струмків на кшталт включень, сталі марки К – 60

Тип включень		2 – й рівень якості металу у відповідності ТТ 232-60-2005: СНД ср.б. ≤ 2,5; макс. б. ≤ 4		
			Порівняльний метал	Дослідний метал
Сульфіди макс.б.		ср.б.	0,23	0,13
		0,36	0,33	
Оксиди	ОС	ср.б.	0	0
		макс.б.	0	0
	ОГ	ср.б.	0	0
		макс.б.	0	0
Силікати	СХ	ср.б.	2,18	1,25
		макс.б.	3,08	1,56
	СП	ср.б.	0	0
		макс.б.	0	0
	СНД	ср.б.	3,37	2,38
		макс.б.	3,82	3,08

Список літератури:

1. Huang, J., Yuan, Z., Shi, S. Flow characteristics for two-strand tundish in continuous slab casting using PIV. *Metals.* 2019. № 9. P. 41–52.

2. Gushchin, V.N. Ul'yanov V.A. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines. *Steel Transl*. 2017. Vol. 47. № 5. P. 320–324.

3. Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Efimova, V.G., et al., Gidrodinamicheskie i fiziko-khimicheskie protsessy v promezhutochnykh kovshakh dlya nepreryvnogo lit'ya stali (Hydrodynamic and Physicochemical Processes in Tundish for Continuous Steel Casting), Kyiv : Naukova Dumka, 2018.

4. Sahai, Y. and Emi, T., Tundish Technology for Clean Steel Production, Singapore: World Scientific, 2008.

5. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., Verzilov, A.P., and Maksaev, E.N., Clogging of submersible nozzles in continuous slab-casting machines. *Steel Transl.* 2014. Vol. 44. № 11. P. 833–837.

6. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., and Kravchenko, A.V., Flotation of nonmetallic inclusions during argon injection into the tundish of a continuous-casting machine. Part 1. *Steel Transl*. 2013. Vol. 43. № 11. P. 673–677.

7. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., and Kravchenko, A.V., Flotation of nonmetallic inclusions during argon injection into the tundish of a continuous-casting machine. Part 2. *Steel Transl*. 2014. Vol. 44, № 1. P. 11–16.

8. Smirnov, A.N., Kuberskii, S.V., Smirnov, E.N., et al., Influence of meniscus fluctuations in the mold on crust formation in slab casting. *Steel Transl.* 2017. Vol. 47. № 7. P. 478–482.

9. Solhed, H., Jonsson, L., and Jönsson. P., A theoretical and experimental study of continuous-casting tundishes focusing on slag-steel interaction, *Metall. Mater. Trans. B.* 2002. Vol. 33. № 2. P. 173–185.

10. Linzer, B., Rimnac, A., Bragin, S., and Yang, B., AHSS production with Averdi ESP: a new door of opportunity opens, Proc. METEC Conf. and Trade Fair and 2nd European Steel Technology and Application Days (ESTAD), Düsseldorf, June 15–19, 2015, Düsseldorf, 2015. P. 290.

11. Brooks, G., Pan, Y., Subagyo, and Coley, K., Modeling of trajectory and residence time of metal droplets in slag-metal-gas emulsions in oxygen steelmaking. *Metall. Mater. Trans. B.* 2005. Vol. 36. № 4. P. 525–535.

Yefimova V.G., Smirnov Yu.O. REFINING OF STEEL IN THE TUNDISH WITH A REACTION CHAMBER

The work shows that in the process of pouring steel through tundishes, it is necessary to reduce the content of non-metallic inclusions. It is shown that the design of the tundish significantly affects the quality of the finished product, namely the content and distribution of non-metallic inclusions in the finished product.

Analysis of literary sources has proven that the content of non-metallic inclusions must be controlled before pouring the finished product.

The change in the free energy of the system is shown when a non-metallic particle is removed. It is established that the chemical potentials and surface tension of the metal practically do not change when non-metallic inclusions come out onto the surface of the melt.

It is established that metallurgical suspensions and emulsions without chemical processes, dissolution and changes in adsorption conditions in the process of surfacing to the metal-gas phase interface are unstable disperse systems, since the change in Gibbs energy is always negative.

It is shown that for non-metallic inclusions in steel, the main mechanism of coarsening is orthokinetic coagulation, which occurs in the presence of a velocity gradient in the direction across the flow.

It is determined that the speed of movement of non-metallic particles depends on the structure of the adsorption layer. The presence of a diffusion structure of the adsorption boundary layer leads to sliding, which manifests itself in a violation of the laws of hydrodynamics.

An equation is established to determine the resident time of a particle of a non-metallic inclusion in the tundish bath. It is shown that to increase the resident time, it is necessary to increase the volume of the tundish and increase the size of the vortices, where the flows can have insignificant velocities sufficient to provide the required duration of contact with the slag of the inclusion.

Physical modeling of the metal refining processes in the tundish equipped with partitions and inert gas purging through a long lance was carried out on a cold model.

A study on a physical model showed that, from a hydrodynamic point of view, the tundish bath should be a damper for the flow velocity created by forced convection.

It was determined that the length of the tundish is determined by the length of the distribution chamber. It depends on the design of the partitions, as well as the angles of inclination of the flow channels.

In the modeling process, the best results were shown by the designs of reaction chambers consisting of two solid partitions with slotted channels at the bottom of the ladle. This design ensured the creation of a directed flow of liquid, which forms two vortex hydrodynamic circulation structures. One of them was formed in the reaction chamber, and the other in the distribution chamber.

Model experiments showed that this design of the tundish provides an increase in the residence time of non-metallic inclusions simulators by 4–6 times more than is the case with the existing design of the tundish.

The effectiveness of using reaction chambers in the tundish bath in combination with inert gas purging of the metal under production conditions has been proven.

Industrial experiments and metallographic studies have shown that there is a 30–40% reduction in the content of non-metallic inclusions.

Key words: *non-metallic inclusions, tundish, dispensing chamber, continuous steel casting, metallographic studies.*

УДК 669.45.85
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/27

Єфімова В.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Смірнов Ю.О.
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
Національної академії наук України

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ПРОДУВАННЯ МЕТАЛУ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ

В роботі показано, що безперервне розливання сталі є широко використовуваним процесом і важливим етапом у виробництві сталі. При цьому чистота стали і строгий контроль складу, поряд з якістю поверхні безперервної заготовки є першочерговими завданнями.

З'ясовано, що чистота стали залежить від кількості, морфології та розподілу за розмірами неметалічних включень. Визначення «чиста сталь» змінюється в залежності від її призначення.

Показано, що проміжний ковш являє собою останню металургійну ємність, в якій можна керувати чистотою готового продукту, застосовуючи продукцію через продувні фурми з різним діаметром газорозподільних каналів.

Визначено, що ступінь рафінування металевого розплаву при використанні продувки інертним газом залежить від діаметра пузиря та діаметру каналу, що виділяє газ.

Визначено, що метою досліджень є теоретичне обґрунтування розміру газового пузиря в виробничому процесі при продуванні сталі інертним газом, а також підтвердження даних аналітичних розрахунків розподілу неметалевих включень після проведення серії промислових експериментів.

У роботі проведено аналіз кінетики переходу частинки неметалевого включення через границю поділу метал – шлак при продуванні металу інертним газом.

Виведено рівняння, що описує процес накопичення частинок неметалевих включень, що було емульговано шлаком.

Показано, що розрахунок швидкості емульгування частинок показує найкращі результати при швидкостях витрати газу 10–12 л·мин$^{-1}$. При цьому загальний об'єм краплин металу в шлаковій фазі збільшується з часом продування. За таких умов швидкість емульгування краплин збільшується відповідно до швидкості їх утворення, в результаті встановлюється стаціонарний режим і стає сталою.

З'ясовано, що при швидкостях потоку понад 12 л·хв$^{-1}$ швидкість утворення крапель вища, проте рівноважні умови досягаються довше.

Численними дослідниками встановлено, що найкращі результати рафінування сталі від неметалевих включень досягаються при діаметрі бульбашок у діапазоні 1–5 мм.

Ґрунтуючись на вище наведених теоретичних засадах, нами було проведено промислові випробування на дворучної МНЛЗ при розливанні сталі марки К-60.

Для підтвердження теоретичних розрахунків було проведено експериментальні дослідження у промислових умовах з використанням продувальної фурми великої протяжності з діаметром газовиділювального каналу 1,5–2 мм, яка в результаті продування дозволяла отримувати бульбашки розміром 4,5–5 мм, та продувною балкою, з діаметром газовиділювальних каналів 0,14–0,16 мм, що дозволяло отримувати бульбашки діаметром 3,0–3,25 мм, з витратою газу 10–12 л·мин$^{-1}$.

В результаті проведених експериментів встановлено, що в дослідному та порівняльному металі зустрічаються переважно тонкі сульфідні включення до 0,5 бали, точкові оксидні включення до 0,5 бали та силікатні включення як глобулярної, так і рядкової форми до 4 бали. У зразках з дослідних слябів кількість оксидів та сульфідів дещо менша, ніж у порівняльному. На всіх зразках зустрічаються неметалеві включення у вигляді скупчень (конгломератів) дрібних включень округлої та неправильної геометричної форми. Максимальні розміри великих включень для металу першого струмка досягають 60–80 мкм, а другого – 50–60 мкм.

Кількісні оцінки у зразках зі слябів, відлитих з продуванням аргоном через продувну балку показали, що кількість великих неметалевих включень (розмір більше 50 мкм) зменшується в середньому 40–80%, порівняно з продуванням через продувну фурму. Зменшення кількості включень розміром 20–45 мкм для слябу другого струмка становить 14–26%.

Ключові слова: *неметалеві включення, проміжний ківш, продувальні пристрої, безперервне розливання сталі, металографічні дослідження.*

Постановка проблеми. Безперервне розливання сталі є широко використовуваним процесом і важливим етапом у виробництві сталі. Близько 90% сталі, що відливається у всьому світі виробляється безперервним методом. У деяких частинах світу, в тому числі Західної Європи, Японії та США, безперервне розливання становить вище 97%. Виникаюча конкуренція у виробничих горизонтах проявляється в строгих вимогах до якості, які стали критичними з позиції прогресивно зростаючого обсягу виробництва. В результаті, чистота сталі і строгий контроль складу, поряд з якістю поверхні безперервної заготовки є першочерговими завданнями.

Неметалічні включення, що утворюються в процесі виробництва сталі значно впливають на властивості сталі та металопродукції. Видалення неметалевих включень у процесах виробництва стали відіграє чільну роль при отриманні продукції високої якості. Головним завданням металургів є видалення неметалевих включень, а також контроль природи і розподіл включень, що залишилися в сталі.

Більшість досліджень продування металу інертним газом, представлених у літературі, присвячені видаленню неметалевих включень в одно-дворучковому проміжному ковші [5–7].

Відомо, що процес продування сталі інертним газом супроводжується цілою сукупністю фізико-хімічних процесів, які характеризуються утворенням металевої емульсії в шлаку, що призводить до збільшення масопереносу між двома рідинами, що не змішуються, в результаті чого зростає швидкість асиміляції неметалічної фази шлаком [8]. Однак розташування продувних пристроїв у багаторучкових проміжних ківшах повинно бути таким, щоб газогідродинамічні потоки рідкої сталі з прикріпленими до бульбашок газу неметалевими включеннями мали однакову температуру та кількісний склад у кожній точці проміжного пристрою, для забезпечення однакової якості литого продукту на кожному струмку.

Чистота сталі залежить від кількості, морфології та розподілу за розмірами неметалічних включень. Визначення «чиста сталь» змінюється в залежності від її призначення [1].

Проміжний ковш – це остання металургійна ємність, в якій можна керувати чистотою готового продукту, застосовуючи продукцію через продувні фурми з різним діаметром газорозподільних каналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що ступінь рафінування металевого розплаву при використанні продувки інертним газом залежить від діаметра пузиря та діаметру каналу, що виділяє газ. Багаточисленними дослідженнями [2–7] встановлено, що використання бульбашок малих розмірів позитивно впливає на процес очищення сталі від неметалічних включень.

Тому метою наших досліджень є теоретичне обґрунтування розміру газового пузиря в виробничому процесі при продуванні сталі інертним газом, а також підтвердження даних аналітичних розрахунків розподілу неметалевих включень після проведення серії промислових експериментів.

Постановка завдання. Метою наших досліджень було:

1) аналітичний аналіз кінетичних процесів видалення неметалевих включень в процесі безперервного розливання сталі;

2) перевірка аналітичних результатів досліджень у промислових умовах;

3) проведення металографічних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Загальна швидкість видалення неметалічних включень у шлаковій фазі з капель металу в проміжному ковше може бути представлена як [2]:

$$V = \left(k_{ш-м}A_{ш} + A_{НВ}k_{ш-НВ} + k_{ш-м}\left(A_{к} + A'_{к}\right)\right)X_{FeO} \quad (1)$$

де $k_{ш-м}, k_{ш-НВ}$ константи швидкості реакцій шлак-метал і шлак-неметалеве включення відповідно; $A_{ш}, A_{НВ}$ – площа шлакової та неметалевої фаз, відповідно; $A_{к}, A'_{к}$ – площа металевих капелей і зменшення площі металевих капелей за рахунок асиміляції неметалічної фази; X_{FeO} – масова частка FeO в шлаку. Однак при використанні рівняння (1) виникають деякі труднощі з визначенням площі металевих краплин. Тому для визначення швидкості масопереносу неметалевої фази в системі метал-шлак часто визначають різницю між об'ємом утворених краплин металу та емульгованих у шлаку $k_{ш-м}\left(V_{Об.} - V_{Эм.}\right)$.

Для визначення кількості капель, що приймають участь в емульгуванні, застосовується закон збереження маси для межі поділу фаз метал – шлак [3]:

$$V_{Д}\left(\tau\right) = V_{Об.}\cdot\tau - \int_{0}^{\tau} V_{Эм.}\left(\tau\right)d\tau \quad (2)$$

де $V_{Д}\left(\tau\right)$ – об'єм краплин, що накопичуються у шлакові й фазі в момент часу τ, у м^3; $V_{Об.}\cdot\tau$ – загальний об'єм краплин, що утворилися у момент часу τ, у м^3; $V_{Об.}$ – об'єм краплини, що залишається сталим у процесі емульгування, м$^3\cdot$с$^{-1}$; $V_{Эм.}$ –

об'єм краплин, що приймають участь в емульгуванні у момент часу τ, м^3·с$^{-1}$.

Диференціювання рівняння (2) призводить до рівняння, що характеризує швидкість переміщення металевих крапель в фазу, що емульгується.

$$\frac{dV_Д(\tau)}{d\tau} = V_{Об.} - V_{Эм.}(\tau) \qquad (3)$$

З наступними граничними умовами:

1: $\tau = 0$, $V_Д = 0$

2: $\tau \to \tau_\infty$, $V_Д = V_\infty$;

де τ_∞ – час барботажу, за якого утворюється стійка емульсія, с; V_∞ – об'єм краплин у стійкій емульсії, об'єм м^3.

З використанням 1-ї граничної умови та інтегрування рівняння (3) отримаємо об'єм краплин, що переходять у шлакову фазу:

$$V_Д(\tau) = V_{Об.} \cdot \tau\left(1 - e^{-\tau/t}\right). \qquad (4)$$

Виходячи з цього швидкість накопичення краплин, що емульгувалися може бути представлена як:

$$\frac{dV_Д}{d\tau} = V_{Об.} e^{-\tau/t} \text{ и } V_{Эм.}(\tau) = R_З\left(1 - e^{-\tau/t}\right). \qquad (5)$$

Проведені розрахунки з використанням даних рівнянь показали, що при швидкостях потоку 10–12 л·мин$^{-1}$ загальний об'єм краплин металу в шлаковій фазі збільшується з часом продування. За таких умов швидкість емульгування крапель збільшується відповідно до швидкості їх утворення, в результаті встановлюється стаціонарний режим і стає сталою.

При швидкостях потоку понад 12 л·хв$^{-1}$ швидкість утворення крапель вища, проте рівноважні умови досягаються довше.

Ґрунтуючись на експериментальних даних, можна припустити, що об'єм перенесеної металевої фази пузирями в шлак залежить від наступних параметрів:

$$V_Д^0 = f\left(r_n, \Delta\rho, \rho_ш, \eta_ш, \eta_м, g\right) \qquad (6)$$

де r_n – діаметр пузиря, *м*; $\Delta\rho$ – різниця між густинами двох рідких фаз, *кг·м*$^{-3}$; $\rho_ш$ – густина шлакової фази, *кг·м*$^{-3}$; $\eta_ш$ и $\eta_м$ – в'язкість шлаку та металу, відповідно, Па·с; g – прискорення сили тяжіння, *м·с*$^{-2}$.

Слід зауважити, що як тільки пузир газу пройде міжфазну границю поділу фаз метал – шлак, поверхневий натяг почне грати значну роль у процесі утворення краплин [4].

Якщо об'єднати змінні та фундаментальні значення у чотири групи, що не мають одиниць виміру, то:

$$Z_1 = f\left(\rho_ш, \eta_м, g, V_Д^0\right);\ Z_2 = f\left(\rho_ш, \eta_м, g, r_n\right);$$

$$Z_3 = f\left(\rho_ш, \eta_м, g, \eta_ш\right);\ Z_4 = f\left(\rho_ш, \eta_м, g, \Delta\rho\right).$$

Звідси отримаємо наступні залежності:

$$Z_1 = \frac{\rho_ш^2 g V_Д^0}{\eta_ш^2};\ Z_2 = \frac{\rho_ш^2 g r_n^0}{\eta_ш^2};\ Z_3 = \frac{\eta_ш}{\eta_м};\ Z_4 = \frac{\rho_ш}{\Delta\rho},$$

що призведе до співвідношення $Z_1 = f\left(Z_2, Z_3, Z_4\right)$ чи $Z_1 = KZ_2^a Z_3^b Z_4^c$.

Отже, об'єм металу, що буде потрапляти у шлакову фазу в процесі продування інертним газом буде визначатися:

$$V_Д^0 = 1{,}04\left(\frac{\eta_ш^2}{\rho_ш^2 g}\right)\left(\frac{\rho_ш^2 g r_n^3}{\eta_ш^2}\right)^{0{,}66}\left(\frac{\eta_ш}{\eta_м}\right)^{-0{,}34}\left(\frac{\rho_ш}{\Delta\rho}\right)^{1{,}66} \qquad (7)$$

чи в одиницях СГС

$$V_Д^0 \approx 0{,}11\eta_м\rho_ш\eta_ш^{-\frac{1}{3}}\Delta\rho^{-\frac{5}{3}}r_n^2 \qquad (8)$$

При використанні рівняння (4) отримаємо загальний об'єм краплин металу, що утворюються у шлаковій фазі у момент часу τ

$$V_{Об.} = \frac{Q}{V_n}V_Д^0 \qquad (9)$$

де Q – витрати газу при продуванні л·хв$^{-1}$; $V_n = 1{,}378Q^{1,2}g^{0,6}$ – об'єм пузиря, мм:

$$V_{Об.} \approx 0{,}19\eta_м\rho_ш\eta_ш^{-\frac{1}{3}}\Delta\rho^{-\frac{5}{3}}\frac{Q}{r_n} \qquad (10)$$

Розрахунки, що проведені з використанням рівняння (10) наведено на рис. 1.

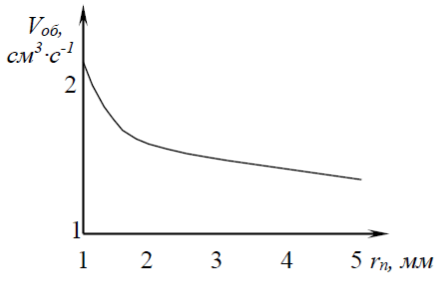


Рис. 1. Залежність швидкості утворення краплин металу у шлаковій фазі від розміру пузиря аргону

Дані рис. 1 свідчать про те, що найбільша кількість крапель спостерігається при діаметрі бульбашок 1 мм. Однак бульбашки менших розмірів мають певні недоліки, які слід враховувати під час реалізації методу продування у промислових умовах. Перший – великий час спливання міхура, а другий – можливість захоплення конвективними потоками затягування їх у зону випускного отвору склянки-дозатора.

Численними дослідниками встановлено, що найкращі результати рафінування сталі від неметалевих включень досягаються при діаметрі бульбашок у діапазоні 1–5 мм [6–8].

Ґрунтуючись на вище наведених теоретичних засадах, нами було проведено промислові випробування на дворучної МНЛЗ при розливанні сталі марки К-60.

На двох рівчаках було встановлено продувні елементи. На першому струмку встановлювалася продувна фурма, з діаметром газовиділювального каналу 1,5–2 мм, яка в результаті продування дозволяла отримувати бульбашки розміром 4,5–5 мм, рис. 2, а. Другий струмок був обладнаний продувною балкою, з діаметром газовиділювальних каналів 0,14–0,16 мм, що дозволяло отримувати бульбашки діаметром 3,0–3,25 мм, рис. 2, б. Витрата газу становила 10–12 л·мин$^{-1}$.

Встановлено, що в дослідному та порівняльному металі зустрічаються переважно тонкі сульфідні включення до 0,5 бали, точкові оксидні включення до 0,5 бали та силікатні включення як глобулярної, так і рядкової форми до 4 бали. У зразках з дослідних слябів кількість оксидів та сульфідів дещо менша, ніж у порівняльному. На всіх зразках зустрічаються неметалеві включення у вигляді скупчень (конгломератів) дрібних включень округлої та неправильної геометричної форми. Максимальні розміри великих включень для металу першого струмка досягають 60–80 мкм, а другого – 50–60 мкм.

Як показали кількісні оцінки у зразках зі слябів, відлитих з продуванням аргоном через продувну балку, кількість великих неметалевих включень (розмір більше 50 мкм) зменшується в середньому 40–80%, порівняно з продуванням через продувну фурму. Зменшення кількості включень розміром 20–45 мкм для слябу другого струмка становить 14–26%.

Висновки. В результаті проведених теоретичних досліджень та промислових випробувань встановлено, що найкращі результати щодо рафінування металу від неметалевих включень досягаються при продувці металу через балку з діаметром газовиділювальних каналів 0,14–0,16 мм.

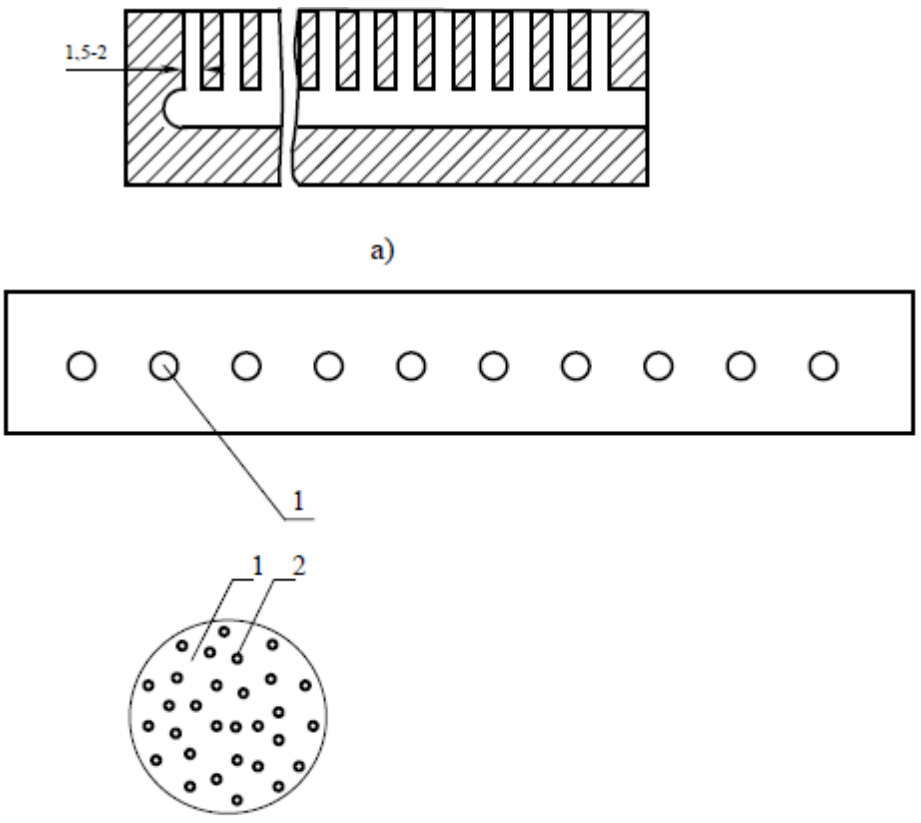


Рис. 2. Конструкція продувальних пристроїв: а – багатоканальна протяжна фурма; б – продувна балка; 1 – продувальний елемент; 2 – канал, що виділяє газ

Список літератури:

1. Huang, J., Yuan, Z., Shi, S., et al., Flow characteristics for two-strand tundish in continuous slab casting using PIV. *Metals*. 2019. № 9. P. 41–52.
2. Gushchin, V.N. and Ul'yanov, V.A. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines. *Steel Transl.* 2017. Vol. 47. № 5. P. 320–324.
3. Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Efimova, V.G., et al., Gidrodinamicheskie i fiziko-khimicheskie protsessy v promezhutochnykh kovshakh dlya nepreryvnogo lit'ya stali (Hydrodynamic and Physicochemical Processes in Tundish for Continuous Steel Casting), Kyiv: Naukova Dumka, 2018.
4. Sahai, Y. and Emi, T., Tundish Technology for Clean Steel Production, Singapore: World Scientific, 2008.
5. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., Verzilov, A.P., and Maksaev, E.N., Clogging of submersible nozzles in continuous slab-casting machines. *Steel Transl*. 2014. Vol. 44. № 11. P. 833–837.
6. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., and Kravchenko, A.V., Flotation of nonmetallic inclusions during argon injection into the tundish of a continuous-casting machine. Part 1. *Steel Transl.* 2013. Vol. 43. № 11. P. 673–677.
7. Smirnov, A.N., Efimova, V.G., and Kravchenko, A.V., Flotation of nonmetallic inclusions during argon injection into the tundish of a continuous-casting machine. Part 2. *Steel Transl.* 2014. Vol. 44, № 1, P. 11–16.
8. Smirnov, A.N., Kuberskii, S.V., Smirnov, E.N., et al., Influence of meniscus fluctuations in the mold on crust formation in slab casting. *Steel Transl*. 2017. Vol. 47. № 7, P. 478–482.

Yefimova V.G., Smirnov Yu.O. DETERMINATION OF OPTIMAL MODES FOR PURGE OF METAL WITH INERT GAS DURING CONTINUOUS CASTING

The paper shows that continuous steel casting is a widely used process and an important stage in steel production. In this case, the purity of the steel and strict control of the composition, along with the surface quality of the continuous billet, are the primary tasks.

It is found that the purity of the steel depends on the amount, morphology and size distribution of non-metallic inclusions. The definition of "pure steel" varies depending on its purpose.

It is shown that the tundish is the last metallurgical container in which the purity of the finished product can be controlled by applying the product through blowdown lances with different diameters of gas distribution channels.

It is determined that the degree of refining of the metal melt when using inert gas blowing depends on the bubble diameter and the diameter of the channel that releases the gas.

It was determined that the purpose of the research is to theoretically substantiate the size of the gas bubble in the production process when blowing steel with an inert gas, as well as to confirm the data of analytical calculations of the distribution of non-metallic inclusions after conducting a series of industrial experiments.

The work analyzes the kinetics of the transition of a non-metallic inclusion particle across the metal-slag boundary when blowing metal with an inert gas.

An equation is derived that describes the process of accumulation of non-metallic inclusion particles that were emulsified by slag.

It is shown that the calculation of the particle emulsification rate shows the best results at gas flow rates of 10–12 l· min^{-1}. At the same time, the total volume of metal droplets in the slag phase increases with the blowing time. Under such conditions, the droplet emulsification rate increases in accordance with the rate of their formation, as a result, a stationary mode is established and becomes constant.

It was found that at flow rates above 12 l ·min^{-1} the droplet formation rate is higher, but equilibrium conditions are reached longer.

Numerous researchers have established that the best results of steel refining from non-metallic inclusions are achieved with bubble diameters in the range of 1–5 mm.

Based on the above theoretical principles, we conducted industrial tests on a two-arm caster when casting K-60 steel.

To confirm the theoretical calculations, experimental studies were conducted in industrial conditions using a long-length blowing lance with a gas discharge channel diameter of 1.5–2 mm, which as a result of blowing allowed to obtain bubbles of 4.5–5 mm in size, and a blowing beam with a gas discharge channel diameter of 0.14–0.16 mm, which allowed to obtain bubbles with a diameter of 3.0–3.25 mm, with a gas flow rate of 10–12 l min^{-1}.

As a result of the experiments, it was established that in the experimental and comparative metal there are mainly thin sulfide inclusions up to 0.5 points, point oxide inclusions up to 0.5 points and silicate inclusions of both globular and linear form up to 4 points. In samples from experimental slabs, the amount of oxides and sulfides is somewhat less than in the comparative one. All samples contain non-metallic inclusions in

the form of clusters (*conglomerates*) *of small inclusions of rounded and irregular geometric shapes. The maximum sizes of large inclusions for the metal of the first stream reach 60–80 microns, and for the second – 50–60 microns.*

Quantitative assessments in samples from slabs cast with argon blowing through a blow beam showed that the number of large non-metallic inclusions (*size more than 50 microns*) *decreases by an average of 40–80%, compared with blowing through a blow lance. The reduction in the number of inclusions with a size of 20–45 microns for the slab of the second stream is 14–26%.*

Key words: *non-metallic inclusions, tundish, blowing devices, continuous steel casting, metallographic studies.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 666.982.24
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/28

Глуховський В.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАЛЕЖНІСТЬ ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ АРМУЮЧОГО КОМПОНЕНТУ ВІД ПАРАМЕТРІВ ПОРИСТОСТІ КОМПОЗИТУ

У статті представлені результати дослідження залежності швидкості деструкції скляних армуючих волокон від дії агресивних новоутворень твердіючого неорганічного в'яжучого та швидкості процесів дифузії агресивних новоутворень, яка визначається параметрами порової структури твердіючої матриці.

Властивості композитних матеріалів залежать не тільки від фізико-хімічних властивостей компонентів, але і від міцності зв'язку між ними. Максимальна міцність досягається, якщо між матрицею і армуючими елементами відбувається утворення твердих розчинів або хімічних сполук. Будь-який зразок класу композитних матеріалів представляє собою комбінацію в певних пропорціях основних (*матриці, неорганічного наповнювача*) *і додаткових компонентів* [1].

Властивості дисперсно-армованих композитів на основі неорганічних в'яжучих та тонких мінеральних волокон або склоцементних композиційних матеріалів залежать від складу компонентів, марки цементу, водоцементного відношення, щільності цементної матриці, виду та складу волокна, їхній орієнтації і рівномірності розподілу в об'ємі, технологій виробництва та умов експлуатації виробів. Взаємодія окремих компонентів та складових композиційних матеріалів відбувається за поверхнями розділу. При армуванні цементних матриць скляними нелугостійкими волокнами взаємодія окремих компонентів відбувається при їх взаємному розчиненні.

Композиції на основі портландцементу і скляного волокна через один рік після виготовлення характеризуються міцністю при розтягненні в межах 9–65 МПа при об'ємному змісті волокна до 10%. Склоцементні матеріали характеризуються також високим опором ударним навантаженням, що є наслідком високої тріщиностійкості і наявністю в'язкого характеру руйнування при усіх видах напруженого стану.

Ключові слова: *композиційний матеріал, неорганічні в'яжучі, скляні волокна, міцність на розтяг при згині, розмір капілярних пор.*

Постановка проблеми. Композиційні матеріали на основі неорганічного в'яжучого та скляного волокна є багатокомпонентною системою, стан якої залежить від великої кількості внутрішніх та зовнішніх факторів. До внутрішніх чинників, що впливають стан системи, можна віднести склад в'яжучого, кількість скловолокна, водоцементне відношення, кількість добавок і заповнювача. Кількісна зміна одного або кількох з цих параметрів спричиняє різку зміну структури композиції, її пористості, лужності середовища, впливає на величину деформації. До зовнішніх факторів можна віднести температуру тепловологої обробки, температуру і вологість середовища зберігання та експлуатації, діючі навантаження. Очевидно, всі перераховані вище фактори безпосередньо впливають на швидкість зміни характеристик міцності композиції. Тому дослідження, присвячені вивченню ступеня впливу цих факторів, можна поділити на дві основні групи. Перша група – дослідження впливу складу композиції на її властивості. Друга – дослідження залежності властивостей композиції від умов зберігання та експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Насамперед на корозію скляних волокон безпосередній вплив робить вибір в'яжучого. Збільшення лужності середовища матеріалу матриці підвищує швидкість корозії волокна. Цим пояснюється вища стійкість волокон

у глиноземистому цементі у порівнянні з портландцементом. Тому автори багатьох робіт пропонують використовувати для скловолокнистих композицій глиноземистий та інші мало вапняні цементи, а також цемент із добавками метакаоліну (до 25%) та мікрокремнезему (до 25%) [2].

Так само відомо, що зміни властивостей композитів на основі цементу армованого скловолокном у часі є результатом дії лужного середовища матриці та процесу ущільнення матриці у зоні її контакту зі скловолокном, що дозволяє стверджувати, що мікроструктура новоутворень в зоні контакту суттєво впливає на довговічність композиції [3].

Залежність між характером структури композиції та кінетикою втрати нею міцності добре ілюструється на прикладі склопластиків. Основною причиною падіння міцності склопластиків є вилуговування скляних волокон водою, яка просочується до їхньої поверхні, дифундуючи по порах матриці. Зменшення або повного згасання цього процесу можна досягти, вводячи в композицію апрети, що знижує пористість і тим самим зменшує корозію волокна. Аналогічний механізм корозії спостерігається при дослідженні роботи склопластикової арматури у бетоні [4], основною причиною якого є лужна корозія склопластикових стрижнів.

На підставі вищезазначеного можливо припустити, що на корозію скловолокна в середовищі неорганічного в'яжучого, що твердіє, може впливати пористість цементної матриці, оскільки значення цього параметру багато в чому визначає процеси масопереносу речовини в тілі композиції. Відомо, що швидкість будь-якої хімічної взаємодії залежить не тільки від концентрації та реакційної здатних компонентів, що беруть участь у реакції, а й від умов, у яких протікає сама реакція. Якщо представити швидкість реакції (V) як залежності: $V = C / \left(1/k + 1/b\right)$, де k – константа швидкості хімічної взаємодії, b – коефіцієнт масопереносу, C – концентрація реакційно здатних компонентів у зоні реакції, то стає очевидним, що за певних умов на швидкість реакції буде впливати і коефіцієнт масопереносу речовини. Швидкість масопереносу, на певних стадіях розвитку склоцементної композиції, буде різною. Оскільки вже в момент замішування цементу водою значення pH рідкої фази різко збільшується, можна вважати, що взаємодія між скловолокном і продуктами гідратації починається в момент їх контакту, тобто в момент формування. На цій стадії швидкість реакції повністю залежатиме від коефіцієнта швидкості хімічної взаємодії, значення якого буде обумовлена мінералогічним складом в'яжучого і хімічним складом волокна.

Надалі, при коагуляції та кристалізації новоутворень, а також внаслідок підвищення концентрації продуктів взаємодії між волокном і новоутвореннями твердіючого в'яжучого в зоні контакту, вплив процесу масопереносу зростатиме. Це обумовлюється наявністю наступних чинників. По – перше, зі збільшенням кількості твердої фази, швидкість дифузії в якій як мінімум на два порядки нижче, ніж при дифузії в рідкій фазі. По – друге, зменшенням значення загальної пористості цементного каменю з часом. В – третіх, малою розчинністю продуктів реакції між волокном і новоутвореннями в'яжучого, які, як відомо, в основному представлені низькоосновними гідросилікатами кальцію [2]. Таким чином, можна припустити, що в кінцевому підсумку значення дифузійного опору (1/b) перевищить значення кінетичного опору (1/k) і процес взаємодії перейде в область дифузійного контролю, після чого швидкість корозії волокна стабілізується і надалі повністю залежатиме від структури новоутворень, які заповнюють зону контакту.

Якщо прийняти запропоновану гіпотезу про наявність дифузійного контролю над процесами хімічної корозії склоарматури за робочу, то можна припустити, що на певній стадії розвитку склоцементної композиції швидкість хімічної взаємодії між скловолокном та продуктами гідратації матриці залежатиме від параметрів, що характеризують мікроструктуру системи. Беручи до уваги, що твердіюче в'яжуче, залежно від його мінералогічного складу, набуває властивості цементного каменю вже до 7–28 діб нормального твердіння, а період інтенсивної втрати міцності склоцементних композицій припадає на більш тривалий проміжок часу, можливо припустити, що швидкість падіння міцності композиції і тривалість самого періоду втрати міцності залежатиме від параметрів, які безпосередньо впливають на характеристики порової структури цементного каменю.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження з встановлення залежності інтенсивності процесів корозії мінерального армуючого компоненту від параметрів пористості склоцементних композиційних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. В якості об'єктів дослідження були використані

композиції на основі портландцементу і лужного цементу та скляних волокон алюмоборосилікатного складу та ті самі волокна з захисним покриттям на основі поліметилфенілсилоксанові смоли.

Параметри порової структури композицій визначалися у відповідності з [5] за кінетико водопоглинання яка описується рівнянням:

$$W_t = W_m\left[1 - e^{-(\lambda t)^{\alpha}}\right] \qquad (1),$$

де: W_t – водопоглинання зразка за час t у відсотках за масою; W_m – повне водопоглинання зразка; e – основа натурального логарифма: t – час водопоглинання, годин; λ – показник середнього розміру відкритих капілярних пор, який дорівнює границі відношення прискорення процесу водопоглинання до його швидкості; α – показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор. Методика [5] передбачає визначення основних коефіцієнтів рівняння (1) за результатами гідростатичного зважування зразків композиції у різні періоди часу. Отримані результати гідростатичного зважування дозволяють також розрахувати значення відкритої капілярної пористості (%) та значення середньої густини (кг/м^3) композиційного матеріалу.

При дослідженнях використовувалися зразки склоцементних композицій виготовленні на основі портландцементу при В/Ц 0,25; 0,30; 0,35 та 0,40 та на основі шлаколужного цементу з Р/Ш 0,30; 0,35 та 0,40. У якості одиничного значення при визначенні межі міцності при згині досліджуваних композицій приймалося середнє арифметичне результатів випробування трьох зразків, параметри порової структури композицій визначалися за результатом випробування шести зразків.

Результати випробування композиційних матеріалів на основі портландцементу армованих незахищеними скляними волокнами та волокнами з захисним покриттям після їх тверднення у нормальних умовах представлені у таблиці 1.

Отримані результати вказують на те, що у віці 28 діб композиції на основі незахищеного волокна характеризуються більш високим рівнем міцності (30,4…41,0 МПа) у порівнянні з композиціями на основі скляних волокон з захисними покриття (29,5…34,7 МПа). З часом, у віці 360 діб, вказана тенденція змінюється на протилежну, Міцність композицій на основі захищеного волокна (22,4…23,5 МПа) перевищує аналогічний показник композицій на основі незахищеного скловолокна (11,8…16,8 МПа).

Показник середнього розміру відкритих капілярних пор композицій на основі незахищеного волокна, на всіх етапах розвитку досліджуваних композицій, перевищує аналогічний показник композицій на основі захищеного волокна.

З метою визначення залежності інтенсивності процесів корозії мінерального армуючого компоненту від показника середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) було визначено швидкість зменшення міцності на розтяг при згині (табл. 2) на різних етапах розвитку композицій за формулою:

$$V_i = \frac{R_1 - R_2}{t_2 - t_1} \qquad (2)$$

де: V_i – швидкість зменшення міцності на розтяг при згині за певний період тверднення композиції, МПа/доба*;* R_1, R_2 – міцність на розтяг при згині, МПа, після тверднення композиції на протязі періоду t_1 та t_2 *діб*, відповідно, де $t_1 > t_2$.

Таблиця 1

Межа міцності на розтяг при згині ($R_{зг}$) та показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) композицій на основі портландцементу при твердненні у нормальних умовах

Показник	В/Ц	Значення показника для композиції на основі портландцементу та							
		незахищеного скловолокна після тверднення на протязі, діб				захищеного скловолокна після тверднення на протязі, діб			
		28	90	180	360	28	90	180	360
Rзг, МПа	0,25	30,4	22,4	17,6	14,1	29,5	26,0	25,0	23,4
	0,30	39,4	25,9	20,5	13,6	37,3	30,4	29,8	23,5
	0,35	39,9	27,2	22,7	16,8	35,2	29,0	26,0	23,5
	0,40	41,0	25,9	20,7	11,8	34,7	26,9	24,2	22,4
λ, відносних одиниць	0,25	6,4	5,3	3,5	2,5	2,0	1,0	0,6	0,3
	0,30	10,2	5,3	4,0	2,9	2,3	1,2	0,7	0,3
	0,35	9,5	4,7	4,0	2,9	2,4	1,5	0,9	0,6
	0,40	13,0	6,5	5,0	3,3	2,8	1,7	0,7	0,4

Таблиця 2

Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій на основі портландцементу при твердненні у нормальних умовах

В/Ц	Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині, МПа/доба, композицій армованих					
	незахищеним скловолокном у період тверднення, діб			захищеним скловолокном у період тверднення, діб		
	28–90	90–180	180–360	28–90	90–180	180–360
0,25	0,13	0,05	0,02	0,06	0,01	0,01
0,30	0,22	0,06	0,04	0,11	0,01	0,04
0,35	0,20	0,05	0,03	0,10	0,03	0,01
0,40	0,24	0,06	0,05	0,13	0,03	0,01

Залежність швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій від показника середнього розміру відкритих капілярних пор, значення якого було визначено на початку періоду, представлено на рисунку 1.

Результати випробування композиційних матеріалів на основі портландцементу армованих незахищеними скляними волокнами та волокнами з захисним покриттям після їх тверднення при пропарюванні представлені у таблиці 3.

Отримані результати вказують на те, що після тепловологої обробки композицій на протязі 3,0 годин композиції на основі незахищеного волокна характеризуються меншим рівнем міцності (15,5…19,3 МПа) у порівнянні з композиціями на основі скляних волокон з захисними покриття (22,0…27,5 МПа). Із збільшенням терміну тепловологої обробки до 31,0 години ця тенденція зберігається, міцність композицій на основі захищеного волокна (15,0…16,9 МПа) перевищує аналогічний показник композицій на основі незахищеного скловолокна (10,8…13,4 МПа).

Показник середнього розміру відкритих капілярних пор композицій на основі незахищеного волокна, на всіх етапах розвитку досліджуваних композицій, перевищує аналогічний показник композицій на основі захищеного волокна, що повторює тенденцію для композицій які тверднуть у нормальних умовах.

Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині для композицій які тверділи при пропарюванні (МПа/год) на різних етапах розвитку композицій представлені у таблиці 4.

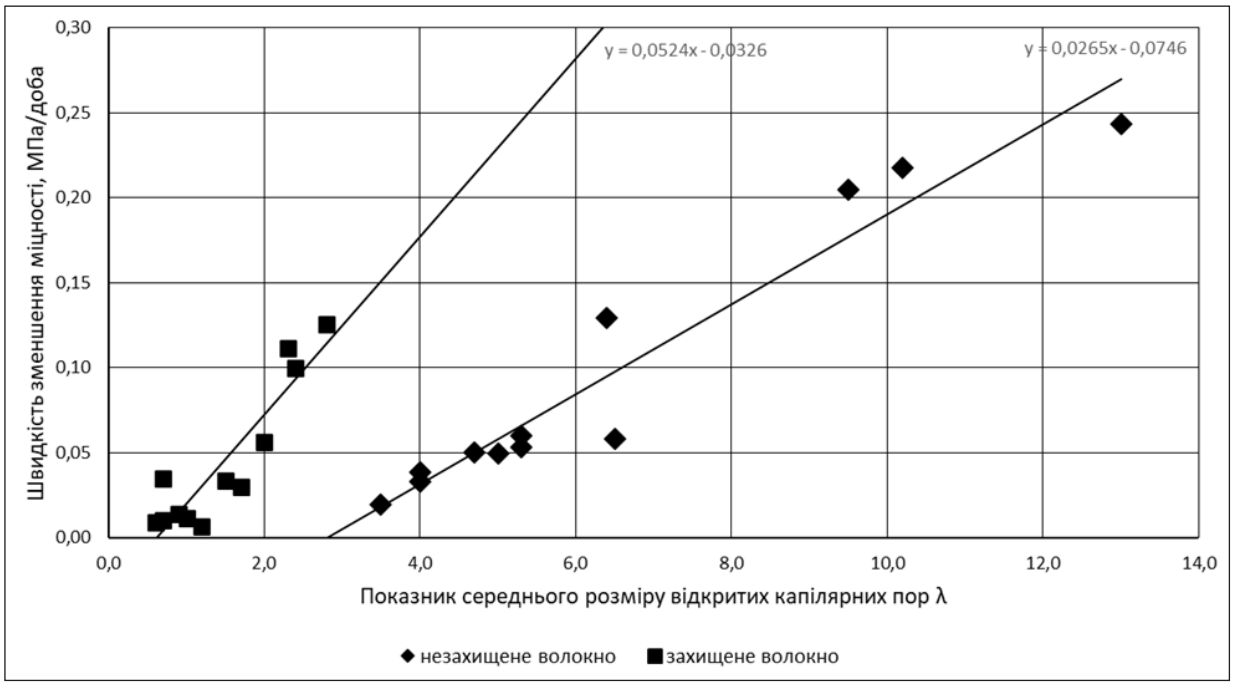


Рис. 1. Залежність швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій від показника середнього розміру відкритих капілярних пор у композицій на основі портландцементу при твердненні у нормальних умовах

Таблиця 3

Межа міцності на розтяг при згині ($R_{зг}$) та показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) композицій на основі портландцементу після їх тверднення при пропарюванні

Показник	В/Ц	Значення показника для композиції на основі портландцементу та							
		незахищеного скловолокна після пропарювання на протязі, годин				захищеного скловолокна після пропарювання на протязі, годин			
		3,0	6,0	15,5	31,0	3,0	6,0	15,5	31,0
Rзг, МПа	0,25	15,5	13,4	11,5	10,8	22,0	19,5	17,6	16,9
	0,30	17,3	15,5	13,0	12,1	25,5	22,5	18,5	15,0
	0,35	19,3	17,0	15,4	13,4	27,9	24,0	19,8	15,5
	0,40	18,0	15,5	13,4	12,0	27,5	23,3	20,3	16,2
λ, відносних одиниць	0,25	4,6	3,9	3,6	1,9	2,5	1,1	0,7	0,5
	0,30	5,0	4,2	3,8	2,2	3,0	1,8	1,4	0,7
	0,35	5,4	4,5	3,8	2,5	3,9	1,8	1,4	0,8
	0,40	6,1	4,7	4,2	2,9	4,7	1,9	1,8	1,0

Таблиця 4

Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій на основі портландцементу після їх тверднення при пропарюванні

В/Ц	Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині, МПа/год, композицій армованих					
	незахищеним скловолокном у період пропарювання, годин			захищеним скловолокном у період пропарювання, годин		
	3,0–6,0	6,0–15,5	15,5–31,0	3,0–6,0	6,0–15,5	15,5–31,0
0,25	0,70	0,20	0,05	0,83	0,20	0,05
0,30	0,60	0,26	0,06	1,00	0,42	0,23
0,35	0,77	0,17	0,13	1,30	0,44	0,28
0,40	0,83	0,22	0,09	1,40	0,32	0,26

Залежність швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій при пропарюванні від показника середнього розміру відкритих капілярних пор, значення якого було визначено на початку періоду, представлено на рисунку 2.

Результати випробування композиційних матеріалів на основі шлаколужного цементу [6] армованих незахищеними скляними волокнами та волокнами з захисним покриттям після їх тверднення у нормальних умовах представлені у таблиці 5.

Отримані результати вказують на те, що початковий рівень міцності композицій на основі лужного цементу і незахищеного скловолокна (29,5…32,5 МПа) менший аналогічного показника композицій армованих захищеним волокном (42,3…46,4 МПа). На відміну від композицій на основі портландцементу, у разі використання лужного цементу, міцність композицій у період нормального тверднення 28…90 діб або практично не змінюється при використанні незахищеного волокна, або зростає при використанні захищеного волокна до рівня 47,2…50,7 МПа. З часом, у віці 360 діб, міцність композицій на основі захищеного волокна (15,0…16,4 МПа) перевищує аналогічний показник композицій на основі незахищеного скловолокна (9,9…10,6 МПа). У порівнянні з композиціями на основі портландцементу, міцність композицій на основі лужного цементу у віці 360 діб характеризується меншим рівнем міцності, а саме 15,0…16,4 МПа і 22,4…23,5 МПа у разі використання захищеного скловолокна та 9,9…10,6 МПа і 11,8…16,8 МПа у разі використання незахищеного скловолокна.

Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині для композицій які тверділи у нормальних умовах на основі лужного цементу (МПа/доба) на різних етапах розвитку композицій представлені у таблиці 6.

Залежність швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій на основі лужного цементу від показника середнього розміру відкритих капілярних пор, значення якого було визначено на початку періоду, представлено на рисунку 3.

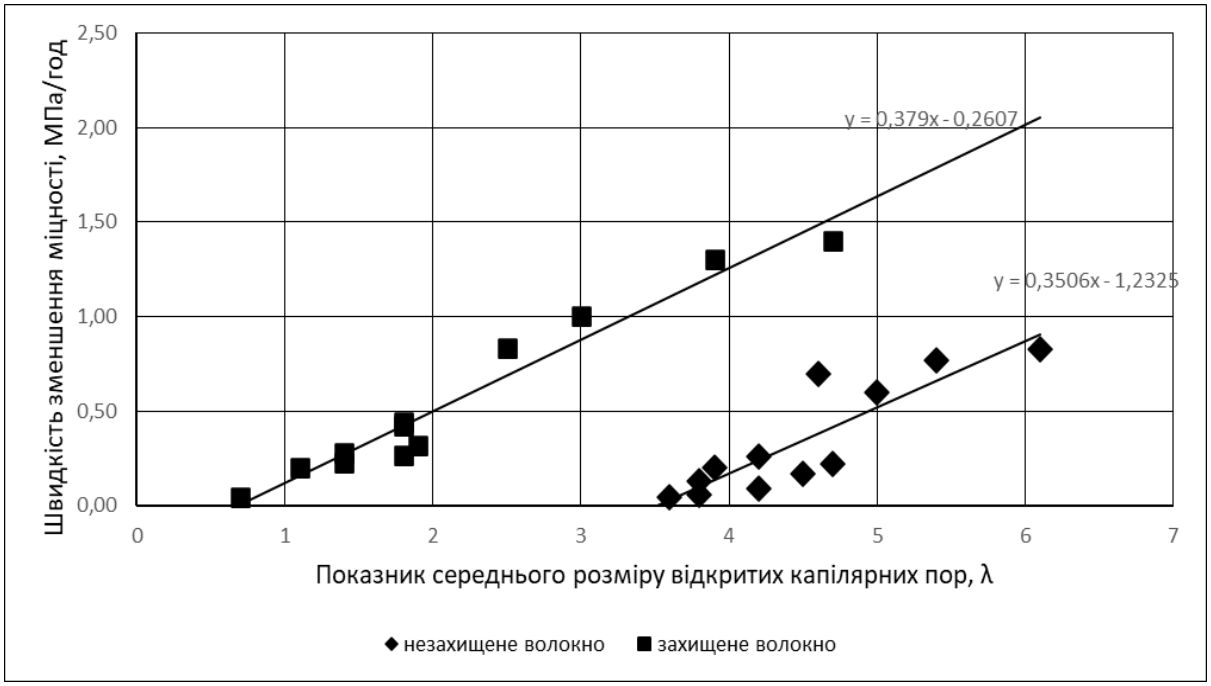


Рис. 2. Залежність швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій від показника середнього розміру відкритих капілярних пор у композицій на основі портландцементу при пропарюванні

Таблиця 5

Межа міцності на розтяг при згині ($R_{зг}$) та показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) композицій на основі шлаколужного цементу при твердненні у нормальних умовах

Показник	В/Ц	Значення показника для композиції на основі лужного цементу та							
		незахищеного скловолокна після тверднення на протязі, діб				захищеного скловолокна після тверднення на протязі, діб			
		28	90	180	360	28	90	180	360
Rзг, МПа	0,30	29,5	29,4	21,7	10,6	42,3	49,1	29,8	16,4
	0,35	32,5	31,3	18,6	10,3	46,4	50,7	31,0	15,5
	0,40	30,6	30,2	17,6	9,9	46,0	47,2	31,9	15,0
λ, відносних одиниць	0,30	0,23	0,18	0,10	0,27	0,35	0,32	0,12	0,23
	0,35	0,35	0,30	0,13	0,29	0,44	0,29	0,17	0,31
	0,40	0,70	0,28	0,10	0,33	0,75	0,25	0,15	0,18

Таблиця 6

Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій на основі лужного цементу при твердненні у нормальних умовах

В/Ц	Швидкість зменшення міцності на розтяг при згині, МПа/доба, композицій армованих					
	незахищеним скловолокном у період тверднення, діб			захищеним скловолокном у період тверднення, діб		
	28–90	90–180	180–360	28–90	90–180	180–360
0,25	0,13	0,05	0,02	0,06	0,01	0,01
0,30	0,22	0,06	0,04	0,11	0,01	0,04
0,35	0,20	0,05	0,03	0,10	0,03	0,01
0,40	0,24	0,06	0,05	0,13	0,03	0,01

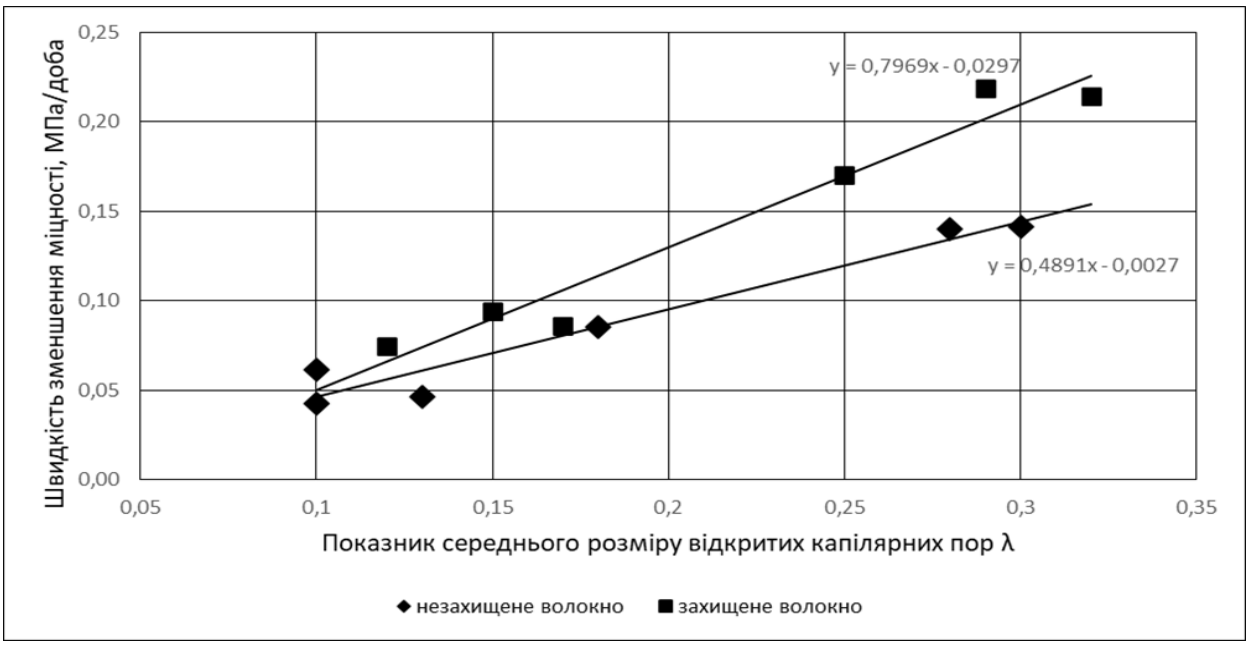


Рис. 3. Залежність швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій від показника середнього розміру відкритих капілярних пор у композицій на основі лужного цементу при твердненні у нормальних умовах

Висновки. Представлені вище залежності швидкості зменшення міцності досліджуваних композицій, виготовлених при різних В/Ц та Р/Ш, з параметрами їх порової структури показує, що незалежно від виду в'яжучого і волокна найбільш явна залежність існує між швидкістю зменшення міцності композицій на певному етапі твердіння і показником середнього розміру пір, визначеним на початку цього етапу. Наведені закономірності є наслідком залежності процесу корозії склоарматури від кількості агресивних новоутворень в'яжучого, що надходять в зону контакту волокно-матриця, концентрація яких у цій зоні постійно зменшується внаслідок їх взаємодії із армуючими волокнами.

Зміщення ліній, що характеризують залежність швидкості падіння міцності від показника середнього розміру відкритих капілярних пор у композицій на портландцементі, армованих захищеним волокном, у бік менших значень середнього розміру пор, пояснюється тим, що в даному випадку показник середнього розміру пор всієї композиції визначається в основному параметрами порової структури цементного каменю, тоді як розмір пор композиції на основі незахищеного волокна збільшується за рахунок пор незахищеної скляній нитки.

Список літератури:

1. Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. – Луцьк: 2017. – 368 с. ISBN 978-617-7070-88-6

2. Shashidhara Marikunte, Corina Aldea, Surendra P. Shah. Durability of glass fiber reinforced cement composites: Effect of silica fume and metakaolin. Advanced Cement Based Materials, Volume 5, Issues 3–4, 1997, P. 100–108, ISSN 1065-7355. https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00003-5

3. Meimei Song, Phil Purnell, Ian Richardson. Microstructure of interface between fiber and matrix in 10-year aged GRC modified by calcium sulfoaluminate cement. Cement and Concrete Research, Volume 76, 2015, P. 20–26, ISSN 0008-8846. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.011.

4. Guangyan Feng, Deju Zhu, Shuaicheng Guo, Md Zillur Rahman, Zuquan Jin, Caijun Shi. A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions. Cement and Concrete Composites, Volume 134, 2022, 104758. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104758

5. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Бетони. Методи визначення середньої густини, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ, 2008. 38 с.

6. ДСТУ Б В.2.7-181:2009 Цементи лужні. Технічні умови. Київ, 2009. 10 с.

Glukhovskyi V.V. DEPENDENCE OF THE INTENSITY OF CORROSION PROCESSES OF THE REINFORCING COMPONENT ON THE POROSITY PARAMETERS OF THE COMPOSITE

The article presents the results of a study of the dependence of the rate of destruction of glass reinforcing fibers on the action of aggressive neoplasms of the hardening inorganic binder and the rate of diffusion processes of aggressive neoplasms, which is determined by the parameters of the pore structure of the hardening matrix.

The properties of composite materials depend not only on the physicochemical properties of the components, but also on the strength of the bond between them. Maximum strength is achieved if solid solutions or chemical compounds are formed between the matrix and the reinforcing elements. Any sample of the class of composite materials is a combination in certain proportions of the main (matrix, inorganic filler) and additional components [1].

The properties of dispersion-reinforced composites based on inorganic binders and fine mineral fibers or glass-cement composite materials depend on the composition of the components, cement grade, water-cement ratio, density of the cement matrix, type and composition of the fibers, their orientation and uniform distribution in the volume, production technologies and operating conditions of the products. The interaction of individual components and composite materials occurs at the interfaces. When reinforcing cement matrices with alkali-resistant glass fibers, the interaction of individual components occurs when they dissolve together.

Compositions based on Portland cement and glass fiber one year after manufacture are characterized by tensile strength in the range of 9–65 MPa with a volumetric fiber content of up to 10%. Glass-cement materials are also characterized by high resistance to impact loads, which is a consequence of high crack resistance and the presence of a ductile nature of fracture under all types of stress.

Key words: *composite material, inorganic binders, glass fibers, bending tensile strength, capillary pore size.*

УДК 661.635.2 : 66.061.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/29

Золотарьова О.В.
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ОЧИЩЕННЯ ЕКСТРАКЦІЙНОЇ ОРТОФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ В ВИРОБНИЦТВІ ЗНЕФТОРЕНОГО АМОНІЙ ФОСФАТУ

В науковій роботі узагальнені та проаналізовані літературні відомості про способи знефторення екстракційної ортофосфатної кислоти. Показана перспективність використання осаджувальних методів очистки, особливо з застосуванням в якості осаджувального реагента сполук кальцію.

Вивчена розчинність калій та кальцій кремнефторидів, кальцій фториду в амонізованих розчинах ортофосфатної кислоти при мольному співвідношенні NH_3 / H_3PO_4 = від 0,2 до 1,5 та знайдені значення рівноважної концентрації фтору в вказаних розчинах.

Виявлені основні закономірності та визначені умови осадження фтору з екстракційної ортофосфатної кислоти в процесі її амонізації в залежності від мольного співвідношення Ca/F в кислоті та режиму амонізації.

Встановлено, що необхідно проводити амонізацію та очищення в декількох каскадно розташованих апаратах. На першому етапі амонізацію ортофосфатної кислоти доцільно проводити при кипінні розчину до pH = 3,5–3,8, при цьому практично не спостерігається виділення амоніаку. Доамонізацію пульпи до оптимального значення pH = 4,4–4,8 рекомендується здійснювати на другому етапі в апаратах, обладнаних тепловідводом для підтримування температури реакційної суміші в межах 85–90°С.

Визначено час, необхідний для очищення амонізованого розчину, – 60–90 хв. Ступінь знефторення при цьому складає ~ 99%.

На підставі проведених експериментальних досліджень розроблена технологічна схема одержання знефторено діамонійфосфату з вмістом фтору менше 0,1% мас.

Запропоновано спосіб регенерації фтору з фторовмісного концентрату, що утворюється в результаті суміщеного процесу очищення та амонізації екстракційної ортофосфатної кислоти.

У складі збалансованих кормів для худоби крім вітамінів, протеїну, жирів повинні бути також мінеральні солі. Найбільш важливими мінеральними елементами в раціоні тварин є фосфор, кальцій, натрій, калій, азот, хлор, сірка та інші. Нестача мінеральних речовин у раціоні тварин викликає зниження продуктивності тварин, захворювання та падіж худоби. Для заповнення дефіциту мінеральних речовин в кормах хімічною промисловістю поставляються сільському господарству синтетичні мінеральні підгодівлі. Світовий асортимент мінеральної підгодівлі налічує більше десяти. Переважне поширення набули кальцій, натрій, амоній фосфати. Застосування кальцій фосфатів для підгодівлі великої рогатої худоби часто стає неможливим, внаслідок того, що рослинні корми містять достатню або навіть надмірну кількість кальцію при дефіциті фосфору. Внаслідок цього співвідношення між елементами досягає 3,5–4 : 1 замість 1,5 : 1, що призводить до серйозних захворювань [1].

Більш ефективною підгодівлею в таких умовах є амоній фосфати, що містять азот, за рахунок якого може бути заповнена нестача протеїну в раціоні жуйних тварин. Встановлено, що введення в раціон великої рогатої худоби та овець амонійних солей або сечовини дозволяє заповнити 25–30% споживаного ними кормового протеїну. Тваринниками відзначено, що діамонійфосфат має перевагу перед сечовиною, внаслідок відсутності токсичності для тварин. Азот амоній фосфату краще засвоюється ніж азот сечовини. Під впливом діамонійфосфату в організмі тварин поліпшується баланс фосфору та інші показники фосфорного обміну.

Ключові слова: *екстракційна ортофосфорна кислота, амонізація, очищення, фтор, знефторення, моно амонійфосфат, діамонійфосфат.*

Постановка проблеми. За оцінкою фахівців найбільш ефективною мінеральною підгодівлею для тварин є амоній фосфат. Виробництво цього продукту засноване на використанні ортофосфатної кислоти, одержуваної електротермічним способом. Висока вартість термічної ортофосфатної кислоти та гострий її дефіцит зумовили необхідність проведення досліджень в області технології знефторених фосфатів на базі більш дешевої екстракційної кислоти. Використання

екстракційної ортофосфатної кислоти стримується через відсутність доступного методу очищення кислоти від домішок, особливо від фтору. Видалення сполук фтору та їх використання в інших галузях народного господарства є важливою економічним та екологічним завданням фосфорної промисловості. Знефторення кислоти здійснюється в процесі екстракції з виділенням фтору в вигляді кремнефториду лужних металів. Експлуатація цього методу вказала на високу економічну ефективність виробництва кормових фосфатів з екстракційної ортофосфатної кислоти. Однак сучасні вимоги до якості мінеральної підгодівлі викликають необхідність більш повного очищення ортофосфатної кислоти з метою зниження концентрації фтору в готовому продукті до нижче 0,1% мас.

Перспективним напрямком для вирішення цієї проблеми є очищення екстракційної ортофосфатної кислоти безпосередньо при її переробці на кормові та технічні фосфати. Постановка досліджень в даному напрямку є актуальною та економічно доцільною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми дослідження очищення екстракційної ортофосфатної кислоти в виробництві знефтореного амоній фосфату розглядалися у роботах Волошина М. Д., Копилова В. М., Крамарьова С. М., Яхонтової Є. Л. та інших вчених. Однак і сьогодні під час проведення експерименту, дана проблема викликає багато запитань.

Постановка завдання. В роботі досліджені основні закономірності очищення фосфорнокислих розчинів від фтору та поведінки домішок екстракційної ортофосфатної кислоти при її амонізації.

Виклад основного матеріалу. Видалення домішок з неочищеної ортофосфатної кислоти досягають різними способами, котрі можна розділити на чотири основні групи:

– осадження фтору неорганічними реагентами;

– термічна обробка кислоти;

очищення кислоти органічними екстрагентами;

– виділення фтору за допомогою іонообмінників.

Способи очищення неорганічними реагентами

Найбільше число досліджень вперше описаних в літературі та впроваджених в промисловості, відносяться до методу видалення фтору в вигляді нерозчинних і малорозчинних кристалічних продуктів, що випадають в осад при додаванні в розчин екстракційної ортофосфатної кислоти різних неорганічних речовин, найчастіше водорозчинних солей лужних металів.

За одним з найбільш ранніх способів до кислоти пропонувалося додавати натрій карбонат до досягнення величини pH = 1,5 одержуваного розчину $H_3PO_4 + NaH_2PO_4$, при цьому фтор осідає в вигляді натрій кремнефториду [4].

Для знефторення екстракційної ортофосфатної кислоти можуть застосовуватися й інші сполуки натрію: Na_2SO_4, NaCl, $NaNO_3$, Na_2SiO_3 [5].

Найбільш ефективне знефторення досягається при додаванні NaOH [4].

Застосування найбільш поширених природних сполук лужних металів – хлоридів має той недолік, що в ортофосфатній кислоті після утворення кремнефториду з'являється хлоридна кислота (до 1,6% Cl^-) присутність якої збільшує корозію апаратури. При подальшій переробці екстракційної ортофосфатної кислоти хлоридна кислота виділяється в газову фазу, що ускладнює очистку відхідних газів.

Для підвищення розмірів кристалів Na_2SiF_6 рекомендується в вихідну екстракційну ортофосфатну кислоту, забруднену фтором, вводити частину раніше отриманого розчину $H_3PO_4 + NaH_2PO_4$, в кількості, достатній для зв'язування всієї H_2SiF_6 в Na_2SiF_6 з подальшим розділення кристалів за фракціями в гідрокласифікаторах.

Вказується на ефективність використання й флокулянтів [4].

Досліджено процес знефторення екстракційної ортофосфатної кислоти содою та натрій сульфатом і встановлено вплив кількості натрієвих солей, послідовності їх введення, часу витримування суспензії, температури та добавок силіцій (IV) оксиду на ступінь осадження фтору з екстракційної ортофосфатної кислоти. Автори досягли ступеня осадження фтору до 92% при цьому залишковий вміст його в кислоті становив 0,1–0,13%мас. при введенні півтораразового надлишку натрієвих солей від стехіометричної кількості з розрахунку на утворення Na_2SiF_6. Час витримування суспензій незначно впливав на ступінь виділення фтору з кислоти, внаслідок чого фільтрування проводилося через 30–60 хвилин. При додаванні в відфільтровану від фосфогіпсу кислоту розчин содосульфатної суміші, для приготування якої застосовувався відхід глиноземного виробництва,

що містить в середньому 28–30% мас. соди, 65–67% мас. натрій сульфату, невелику кількість $(Fe, Al)_2O_3$, NaCl, SiO_2, ступінь знефторення кислоти при 60–65°С досягав 75–80%, а залишковий вміст фтору був досить високим і становив 0,33–0,42% мас. [5].

Обробка ортофосфатної пульпи в процесі отримання екстракційної ортофосфатної кислоти синтетичними або природним складним силікатом заліза та алюмінію, наприклад, серпентином, пальгорскітом в кількості 5% мас. спільно з натрій сульфатом або натрій хлоридом знижує вміст фтору в кислоті до 0,1% мас. і менш.

Автор [5] встановив, що додавання до розчину ортофосфатної кислоти 2–4% NaCl викликає висолювальну дію по відношенню до Na_2SiF_6, але в присутності солей алюмінію осадження фтору неповне, за рахунок утворення комплексного іона більш розчинного креоліту .

Для досягнення високого ступеня очищення кислоти від домішок при введенні карбонату або натрій фосфату рекомендується в кислоті регулювати молярное співвідношення $Al : Si : F : SO_4^{--} : Ca = 1 : 0,8 \div 12 \div 16 : 1,5 \div 2 : 4 \div 8$ [16].

Кристали Na_2SiF_6 осаджуються в вигляді загустілого шламу, що містить натрій фосфати, внаслідок чого втрачається частина P_2O_5, і осад важко відділяється від розчину. Так при відділенні осаду Na_2SiF_6 на центрифугах, залишковий вміст фтору в кислоті складає 0,39–0,56% мас [3].

Для зменшення цих явищ, які ускладнюють процес, запропоновано підвищувати в кислоті концентрацію сульфатного іона від 1,5 до 2,5%, вважаючи на загальну кількість кислоти. Отриманий при цьому осад кальцій сульфату видаляються декантацією, а в освітлений розчин додається суміш натрій силікату з натрій гідроксидом.

При використанні натрій хлориду в двократному надлишку від стехіометричного співвідношення можливе одержання кислоти з низьким вмістом фтору, при цьому на ступінь його осадження його не впливає концентрація P_2O_5 і кількість домішок Al_2O_3 Fe_2O_3.

Процес знефторення застосуванням калій хлориду був досліджений при розробці технології отримання кормового преципітату з суперфосфату [18] і при упарюванні кислоти $KCl : H_3PO_4 = 0,3 – 0,6 : 1$.

Відзначається, що при використанні для осадження фтору сполук калію досягається більш високий ступінь знефторення в порівнянні з застосуванням натрієвих сполук.

В якості джерела натрію й калію при очищенні екстракційної ортофосфатної кислоти запропоновано використовувати мелясу або барду – відходи харчової промисловості.

Розроблено замкнуті системи виділення фтору на заводах фосфорних добрив, засновані на осадженні фтористих сполуку з розчину екстракційної ортофосфатної кислоти в вигляді Na_2SiF_6 натрій флуоридом.

Осаджений Na_2SiF_6 згущують, відокремлюють від розчину та піддають термічному розкладанню при температурі 750°С на SiF_4 та зворотний NaF, або до згущеного Na_2SiF_6 додають метасилікат типу Me_2SiO_3, аміачну вода та NaCl, з метою одержання кремнезему та NaF – знефторювального реагенту на першому ступені. З метою підвищення чистоти кремнефториду, в ортофосфатну кислоту перед введенням сполук натрію пропонується вводити іони амонію в кількості, що забезпечує співвідношення = 0,07–0,1.

Для очищення екстракційної ортофосфатної кислоти від фтору можливе використання сполук барію і кальцію [4], при цьому досягається більш тонке очищення ортофосфатних розчинів, придатних для отримання кормових і харчових продуктів. При знефторенні екстракційної ортофосфатної кислоти, переважно з концентрацією 10–30% мас. P_2O_5, додають сполуки кальцію до вмісту 0,25–0,3% мас. CaO в розчині, вводять достатню кількість HF, щоб перевести катіони кальцію, алюмінію, заліза, магнію в флуориди, які осаджуються з $CaSO_4$.

Встановлено можливість осадження фтору шляхом обробки ортофосфатних розчинів нефеліном.

При взаємодії ортофосфатної кислоти з сечовиною при температурі від 0 до 25°С знижується вміст домішок в 10 разів.

Пропонується використання реакції подвійного обміну при змішуванні екстракційної ортофосфатної кислоти з сечовиною в стехіометричній кількості, необхідній для утворення фосфату сечовини, що утворює тверду фазу, з наступним промиванням осаду нітратною кислотою. В осаді міститься більше 50% домішок, присутніх в кислоті [2].

Для зниження концентрації сульфат-іона при очищенні екстракційної ортофосфатної кислоти від фтору запропоновано кислоту обробляти одночасно $Ca(OH)_2$ і Na_2CO_3 або NaOH.

Представляють інтерес методи знефторення екстракційної ортофосфатної кислоти з одночасним отриманням продукту. В даний час для

отримання кормового преципітату з екстракційної ортофосфатної кислоти використовують двоступеневе преципітування. Зазвичай на першому ступені преципітують пульпу на 30–40%. При цьому осаджується фтор і частина фосфатів заліза та алюмінію. Осад, що виділився, представляє собою добривний преципітат, а розчин, який залишився після відділення від осаду, преципітують з отриманням кормового преципітату. Такий метод дозволяє отримувати кормовий продукт з вмістом фтору менше 0,1% мас.

Запропоновано методи осадження домішок екстракційної ортофосфатної кислоти при отриманні амоній фосфатів за багатоступеневими схемами. Наприклад, екстракційну ортофосфатну кислоту попередньо обробляють гідроксидом, карбонатом або хлоридом лужного металу та відокремлюють осад кремнефториду. Далі кислоту амонізують до pH = 3,5–6 і відокремлюють осади алюміній та залізо фосфатів. Очищений фільтрат амонізується на наступній стадії до pH більше 6. Очищення кислоти від домішок при отриманні амоній фосфатів можливо поєднувати з очищенням рециркулюючих маточних розчинів, що містять фтор і сульфат-іони. При їх змішуванні та введенні в реакцію фосфатної руди відбувається утворення кальцій сульфату та кальцій фториду, що виводяться з реакційної суміші, з подальшою її амонізацією до утворення нерозчинних сполук. З отриманого розчину з концентрацією фтор і сульфат-іонів, що не досягли тих значень, при яких вони осаджуються з амоній фосфатом, кристалізують амоній фосфат.

Знефторення термічною обробкою кислоти

Суміщення процесу хімічного очищення з термічною обробкою кислоти має важливу перевагу в порівнянні з розглянутими методами, що полягає в тому, що одночасно з очищенням кислоти здійснюється й її концентрування.

Відомо, що з підвищенням температури й концентрації P_2O_5, вміст фтору в екстракційній ортофосфатній кислоті зменшується. На підставі цієї властивості запропоновано велику кількість способів знефторення кислоти в процесі її упарювання або концентрування [3].

Встановлено, що при випарюванні кислоти до концентрації 52–55% мас. P_2O_5 в газову фазу виділяється 80–90% мас. фтору, що міститься в екстракційні ортофосфатній кислоти. Упарена до такої до такої концентрації кислота містить 0,5–0,6% мас. фтору.

Збільшити ступінь виділення фтору можна шляхом додавання в кислоту різних летких речовин, наприклад, бензину, ацетону, або продуванням через неї повітря, водяної пари або інертного газу при температурі вище точки кипіння кислоти, а також шляхом барботажу топкових газів. При цьому фтор виділяється в газову в вигляді сполук SiF_4 і HF. Широке застосування для інтенсифікації процесу знаходить додаткове введення в кислоту SiO_2 або силікатних матеріалів спільно з натрієвими солями. Ортофосфатну кислоту, яка містить 30–32% мас. P_2O_5 і 1,7–1,9% мас. фтору, упарюють до концентрації 55–60% мас. P_2O_5, додаючи тонкодисперсний SiO_2, наприклад, отриманий при переробці газів, що виділилися при розкладанні природного фосфату і містять SiF_4. Фтористі гази, що виділяються при випарюванні кислоти, використовують для отримання фторидів, а SiO_2, що утворюється при повертають в процес знефторення кислоти [3]. Очищена кислота, яка містить до 0,1% мас. фтору, придатна для приготування технічних фосфатів.

Висока швидкість дефторування кислоти досягається при кипінні в присутності 0,3–1,2% мас. кремнію з безперервним додаванням води з метою підтримування постійної концентрації P_2O_5 в киплячій суміші.

З метою отримання чистих фосфатних розчинів запропоновано до неочищеного розчину екстракційної ортофосфатної кислоти, який містить менш 25% мас. P_2O_5, додавати кислоту з більш високим вмістом фосфорного ангідриду, що викликає випадання в осад основних домішок кислоти [5].

Способи знефторення екстракційної ортофосфатної кислоти, пов'язані з її випарюванням, знайшли порівняно широке застосування. Однак, ці способи мають ряд істотних недоліків: дороге апаратурне оформлення, великі додаткові енерговитрати, а також те, що сполуки заліза, алюмінію, магнію та кальцію залишаються в розчині і потрібно додаткове очищення. Крім того, упарена ортофосфатна кислота стає більш в'язкою, що викликає певні труднощі з її подальшою переробкою.

Способи очищення з застосуванням органічних екстрагентів і іонообмінників

Процеси засновані на здатності органічних сполук селективно екстрагувати ортофосфатну кислоту. Спочатку селективну екстракцію застосовували для обробки маточних розчинів виробництва фосфатів з низьким вмістом домішок, а згодом стали використовувати для обробки кислоти, відокремленої від кальцій

сульфату. Деякі з цих способів використовуються в промисловості. Пульпа, отримана після розкладання фосфориту сульфатною кислотою, обробляється органічним розчинником, в якості якого можна використовувати кетони, альдегіди, ефіри, аліфатичні та ароматичні спирти, наприклад, бутиловий, аміловий і інші, або суміш спирту та ефіру. Їх беруть приблизно п'ятикратне кількість від маси пульпи. Для розділення ортофосфатної кислоти та розчинника передбачається кілька процесів, наприклад, дистиляція, нейтралізація содою або амоніаком, екстракція чистою водою або летким вуглеводнем типу бензолу [4].

Метод, запропонований М. М. Фольковою, полягає в тому, що після відділення осаду солей заліза та алюмінію з розчину викристалізовують натрій фосфат. Кристали нагрівають до плавлення, в розплавлену масу вводять сульфатну кислоту та відганяють воду під вакуумом, після чого ортофосфорну кислоту відокремлюють від натрій сульфіту екстракцією спиртом.

Запропоновано також ряд методів очищення кислоти іонообмінними смолами. При використанні катіонітів вихідна кислота піддається подвійному очищення. Спочатку додаванням $BaSO_4$, $BaCO_3$ та H_2S осаджують сульфати та арсен, а потім пропускають розчин через катіоніт або аніоніт.

При розробці процесу сорбційної очистки екстракційної ортофосфатної кислоти з метою отримання кислоти, придатної для виробництва кормових та харчових фосфатів, вивчені властивості аніонітів АМП і АН-22. Максимальна ємність АМП за фтор-іоном 80 мг/л в інтервалі температури 20–60°С. Зі збільшенням концентрації P_2O_5 і SO_3 ємність смоли за фтором знижується. Ємність АН-22 за фтором вище й становить 115–130 мг/л.

Висновки. Застосування органічних розчинників і сорбентів для очищення екстракційної ортофосфатної кислоти має перспективне майбутнє, оскільки з розвитком промисловості органічного синтезу з'являються дешеві розчинники, що маю високу виборчу здатність. Однак, в своїй більшості органічні розчинники – це вибухо-пожежонебезпечні речовини, що є суттєвою причиною, яка стримує їх використання для селективних методів очищення екстракційної ортофосфатної кислоти.

Список літератури:

1. Бахтіна Я. В. Обгрунтування вибору осаджувального реагенту для очистки екстракційної ортофосфатної кислоти / Сучасний рух науки : тези доп. IX міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 2–3 грудня 2019 р. Дніпро, 2019. Т.1. С. 80–84.

2. Основи охорони праці : підручник / Запорожець О. І., Протоєрейський О. С., Франчук Г. М., Боровик І. М. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 264 с.

3. Охорона праці в галузі : навч. посіб. / Атаманчук П. С., Мендерецький В. В., Панчук О. П., Білий Р. М. Київ : Центр учбової літератури 2017. 322 с.

4. Загребельна, О. Ю., Василенко, К. В., Ніколенко, М. В. / Аналітичний контроль у виробництві фосфатних харчових добавок, Хімія та сучасні технології, 2 том збірника тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Дніпро. 2019. Т. 2. С. 83.

5. Малахова К.В., Меджидова Е.К., Ніколенко Н.В. Оптимізація умов синтезу харчових фосфатів. / Стан і перспективи розвитку хімічної, харчової промисловості. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Херсон. 2017. С 27–28.

Zolotarova O.V. RESEARCH ON PURIFICATION METHODS OF EXTRACTION-GRADE ORTHOPHOSPHORIC ACID IN THE PRODUCTION OF DEFLUORINATED AMMONIUM PHOSPHATE

This scientific work summarizes and analyzes the literature data on the defluorination methods of extraction-grade orthophosphoric acid. The prospectivity of using precipitation purification methods, especially with the application of calcium compounds as a precipitating agent, is shown.

The solubility of potassium and calcium silicofluorides, and calcium fluoride in ammoniated orthophosphoric acid solutions at a molar ratio of NH3 / H3PO4 = from 0.2 to 1.5 was studied, and the equilibrium fluorine concentration values in these solutions were determined.

The main regularities were revealed and the conditions for fluorine precipitation from extraction-grade orthophosphoric acid during its ammoniation were determined, depending on the Ca/F molar ratio in the acid and the ammoniation regime.

It was established that ammoniation and purification should be carried out in several cascade-arranged apparatuses. In the first stage, the ammoniation of orthophosphoric acid is advisable to conduct at the

boiling point of the solution to a pH of 3.5–3.8, whereby ammonia release is practically not observed. The post-ammoniation of the pulp to an optimal pH value of 4.4–4.8 is recommended to be carried out in the second stage in apparatuses equipped with heat removal to maintain the temperature of the reaction mixture within the range of 85–90°C.

The time required for the purification of the ammoniated solution was determined to be 60–90 minutes. The degree of defluorination achieved is ~99%.

Based on the conducted experimental studies, a technological scheme for obtaining defluorinated diammonium phosphate with a fluorine content of less than 0.1 wt.% was developed.

A method for the regeneration of fluorine from the fluorine-containing concentrate, which is formed as a result of the combined purification and ammoniation process of extraction-grade orthophosphoric acid, is proposed.

In the composition of balanced animal feed, besides vitamins, protein, and fats, mineral salts should also be present. The most important mineral elements in the animal diet are phosphorus, calcium, sodium, potassium, nitrogen, chlorine, sulfur, and others. A deficiency of minerals in the animal diet causes a decrease in animal productivity, diseases, and livestock mortality. To compensate for the deficit of minerals in feed, the chemical industry supplies agriculture with synthetic mineral supplements. The global assortment of mineral feed supplements numbers more than ten. Calcium, sodium, and ammonium phosphates have gained the most widespread use. The application of calcium phosphates for feeding cattle often becomes impossible due to the fact that plant-based feeds contain a sufficient or even excessive amount of calcium with a phosphorus deficiency. As a result, the ratio between the elements reaches 3.5–4 : 1 instead of 1.5 : 1, which leads to serious diseases [1].

A more effective feed supplement under such conditions is ammonium phosphates, which contain nitrogen, thereby helping to compensate for the protein deficiency in the diet of ruminant animals. It has been established that the introduction of ammonium salts or urea into the diet of cattle and sheep allows for the replacement of 25–30% of the feed protein they consume. Animal breeders have noted that diammonium phosphate has an advantage over urea due to the absence of toxicity to animals. The nitrogen in ammonium phosphate is better absorbed than the nitrogen in urea. Under the influence of diammonium phosphate, the phosphorus balance and other indicators of phosphorus metabolism in the animal organism are improved.

Key words: *extraction-grade orthophosphoric acid, ammoniation, purification, fluorine, defluorination, monoammonium phosphate, diammonium phosphate.*

УДК 622.794
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/30

Кривда Р.В.
Дніпровський державний технічний університет

Гаценко К.В.
Дніпровський державний технічний університет

Бєлянська О.Р.
Кам'янське вище професійне училище

Кравченко О.В.
Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СТВОРЕННЯ БРИКЕТІВ ПРИ ДОДАВАННІ У ЯКОСТІ В'ЯЖУЧОЇ РЕЧОВИНИ КИСЛОЇ СМОЛКИ ТА ФУСІВ

Сучасна українська коксохімічна промисловість потребує модернізації через застарілі технології, що призводять до значних втрат ресурсів та забруднення довкілля. Актуальним напрямком є впровадження ресурсозберігаючих технологій, зокрема використання вугільних брикетів, що сприяє утилізації відходів та підвищенню ефективності виробництва.

Метою даної роботи є дослідження процесу створення вугільних брикетів із застосуванням кислої смолки та фусів як ефективних в'яжучих речовин, а також всебічна оцінка їхніх фізико-механічних характеристик, зокрема міцності на стискання.

У лабораторних умовах було проведено експериментальне дослідження впливу різних концентрацій кислої смолки та фусів на формування та міцність вугільних брикетів. Кисла смолка та фуси, будучи побічними продуктами коксування, володіють цінними зв'язувальними властивостями. При нагріванні смола розм'якшується, проникаючи у пори вугілля та утворюючи після затвердіння міцну матрицю, що значно підвищує міцність брикетів. Крім того, фуси, завдяки високому вмісту смолистих речовин, не тільки підсилюють міцність брикетів за рахунок утворення міцних смолистих зв'язків між вугільними частинками, а й впливають на кінетику коксоутворення та мікроструктуру коксу. Передбачається, що їх застосування дозволить знизити питому витрату вугілля на одиницю маси коксу, покращити реакційну здатність коксу та зменшити пиловиділення під час завантаження.

Встановлено, що для формування міцних брикетів оптимальним є тиск не менше 35 МПа. При додаванні 15% кислої смолки міцність брикетів досягає 53%. При використанні 15% фусів міцність сягає до 60%. Дослідження показали, що низький вміст в'яжучого призводить до утворення пористої структури та недостатньої міцності, оскільки не забезпечується повне покриття вугільних частинок. Водночас, оптимальні концентрації в'яжучих забезпечують щільну та однорідну структуру брикетів. Результати свідчать про наявність оптимальної концентрації фусів, що забезпечує найкращі властивості брикетів, а надлишок в'яжучого може навіть знижувати міцність через надмірну пластичність.

Запропоновані у роботі рішення демонструють високу економічну доцільність та сприяють підвищенню ефективності коксохімічного виробництва, а також раціональному використанню цінних вторинних ресурсів.

Ключові слова: *вугілля, брикетування, кисла смолка, фуси.*

Постановка проблеми. Українські коксохімічні заводи потребують модернізації через застарілі технології [1], що спричиняють значні втрати ресурсів та забруднення. Перехід на ресурсозберігаючі технології є необхідним кроком для сталого розвитку. Коксування є енергоємним процесом з великими викидами.

Наразі українська коксохімічна промисловість переживає складний період, зумовлений кількома чинниками: зміною структури споживання енергії (зниження попиту на сталь), значними екологічними проблемами (підприємства є великими забруднювачами), посиленням міжнародної конкуренції та застарілим обладнанням, що потребує модернізації [2, 3].

Створення ресурсозберігаючої технології зменшить ці викиди, знизить споживання ресурсів, покращить екологію та підвищить

конкурентоспроможність. Залучення брикетованого вугілля у технологію отримання доменного коксу є перспективним напрямком, що покращує ефективність та економічність коксування. Використання брикетів із вугілля має ряд переваг, а саме: стабільність якості коксу; зменшення викидів; збільшення продуктивності; зменшення втрат вуглецю; використання дрібних фракцій вугілля; зменшення питомої витрати коксу [1–3].

Брикетування вугільного пилу та дрібних фракцій підвищує якість коксу та знижує питомі витрати сировини. Технологія активно розвивається, зокрема у напрямку створення екологічно чистих зв'язуючих речовин [2, 3]. Це робить брикетування ефективним інструментом для модернізації виробництва вуглецевих матеріалів, підвищення їх конкурентоспроможності та покращення екологічних показників у різних галузях промисловості.

Таким чином, дослідження ресурсозберігаючої технології коксування з вугільними брикетами є актуальним та економічно обґрунтованим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі активно досліджуються оптимальні склади для брикетування бурого та кам'яного вугілля з використанням шламів худого вугілля, а також дешеві та нетоксичні в'яжучі речовини, зокрема з відходів коксохімічної промисловості, для підвищення механічної міцності та водостійкості брикетів [4]. Технологічні параметри брикетування без в'яжучих (вологість, розмір вугілля, тиск, температура сушіння, тривалість пресування) взаємозалежні, і їх оптимізація критична для досягнення максимальної міцності. Незважаючи на багаторічний досвід, виробництво брикетів в Україні майже зупинилося через дефіцит сировини, відсутність якісних вітчизняних в'яжучих та сучасного обладнання. Можливим шляхом стабілізації є виготовлення брикетів з низькосортної вуглецевої сировини з використанням доступних, дешевих та нетоксичних зв'язуючих речовин, що є розумним способом використання, зокрема, бурого вугілля, хоча питання його брикетування та деяких видів кам'яного вугілля ще потребують детального вивчення [4].

Цікавим технологічним прийомом є використання шламу мастильного масла з дротяного заводу, що містить органічні сполуки (переважно жирні кислоти) з хорошими вя'жучими властивостями та показниками горіння [5]. У дослідженні [5] з'ясовано, що брикети, виготовлені з подрібненого вугілля з цим шламом, у якості в'яжучої речовини (в'язкість 2,44 Па·с), досягають оптимальної міцності на розрив при тиску формування 12 МПа та вмісті шламу 16%.

Також відомі дослідження щодо використання кам'яновугільного дьогтю та мелясного композитного матеріалу у якості в'яжучих речовин для виробництва вугільних брикетів [6]. Вчені [7] досліджують використання біовугільних брикетів з сільськогосподарських відходів – гранатових/оливкових та вугілля для забезпечення стійких енергетичних потреб в умовах дефіциту енергії.

Згідно дослідження [8] брикети, що виготовлені на основі в'яжучої речовини – фекального шламу [8], шламу рослинного походження [9] показали перспективні результати щодо зниження викидів у атмосферу, збільшення часу горіння та міцності при стисканні.

У дослідженні [10] для виробництва вугільних брикетів, при використанні у якості в'яжучої сировини карбонізованої шкаралупи арахісу, шкаралупи кешью та стебла проса. Було встановлено, що ці брикети мають високий вміст золи (35,68% для арахісу, 17,98% для кешью, 19,29% для проса), нижчі теплові значення (19,49, 26,52 та 22,22 МДж/кг відповідно) та низьку стискаючу міцність (0,34, 0,88 і 1,66 МПа відповідно) [10].

Бездимні паливні брикети з низькосортного вугілля та кісточок оливок (як біомаси), згущені гуматами або мелясою, демонструють перспективні механічні властивості та поведінку при горінні [11].

У роботі [12] досліджено виготовлення вугільних брикетів на основі вугілля і полімерних сполучних. Брикети отримували традиційною технологією: подрібнення, сушіння, змішування, нагрівання, пресування та охолодження. Встановлено, що ПЕТ не руйнує структуру брикету, а після кальцинації основною фазою залишається аморфний вуглець із включеннями оксидів Fe, Si, Ca, польового шпату та Fe_2SiO_4. У результаті розроблено оптимальні умови формування брикетів.

У дослідженні [13] вивчено брикетування трьох типів вугілля з метою створення бездимних паливних брикетів. Виявлено, що мезопористість вугілля значно впливає на міцність брикетів, спричиняючи їх руйнування при зсувних навантаженнях, незважаючи на подібний елементний склад.

Дослідження [14] описує виробництво некарбонізованих біовугільних брикетів із

суміші низькосортного вугілля (з різним вмістом Сульфуру: 6,57% з Карінгін-Гарут та 0,51% з Баях-Лебак) та ферментованого коров'ячого гною (теплотворна здатність 4192 ккал/кг, 1,56% Сульфуру). Ферментація суміші за допомогою біоактиватора Garant (1:40) + 1% меляси протягом 24 годин дозволила знизити загальний вміст Сульфуру до 1,00–1,14%, що відповідає якісним вимогам. Органічний Сульфур у брикетах знизився на 38–58%.

Дослідження показали, що механічна міцність брикетів залежить від складу суміші, вологості, тиску пресування, режиму теплової обробки та типу сполучної речовини. Зокрема, стискальна міцність зростає у брикетах з дрібним вугіллям (до 1,5 мм) завдяки кращому контакту зі сполучною речовиною [15]. Брикети з модифікованою смолою та бітумом мають на 15–35% вищу міцність, знижений вміст золи (15–18%) та сірки (у 7–15 разів), а також зменшене водопоглинання (на 40–60%). Водночас, брикети з більшими частинками (до 3 мм) утричі менш міцні. Використання вугільного шламу та картонних відходів дозволяє виробляти легкі паливні брикети, що сприяють утилізації відходів та зменшенню шкідливих викидів завдяки отворам для кращого згоряння [15].

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження процесу створення вугільних брикетів із застосуванням кислої смолки та фусів як в'яжучих речовин, а також оцінка їхніх фізико-механічних характеристик. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання: вивчити вплив додавання кислої смолки та фусів на технологічні параметри процесу брикетування; визначити оптимальні концентрації кислої смолки та фусів, що забезпечують максимальну міцність та стабільність брикетів; дослідити фізико-механічні властивості отриманих брикетів (міцність на стискання).

Виклад основного матеріалу. У лабораторних умовах досліджували брикетування вугілля з додаванням кислої смолки та фусів. Мета – оцінити вплив їх концентрацій на міцність брикетів. Застосування таких брикетів у коксуванні є перспективним для підвищення ефективності та екологічності процесу. Кисла смолка та фуси, як побічні продукти коксування, мають гарні зв'язувальні властивості. Смола розм'якшується при нагріванні, проникає в пори вугілля та після затвердіння утворює міцну матрицю. У процесі пресування вона додатково підвищує міцність брикетів, а при коксуванні залишає вуглецевий залишок, що підсилює структуру коксу.

До того ж, передбачається, що додавання фусів як в'яжучої речовини у вугільні брикети збільшить їх міцність завдяки утворенню смолистих зв'язків між вугільними частинками. Це також дозволить знизити питому витрату вугілля, покращити реакційну здатність коксу та зменшити пиловиділення під час завантаження. Фус, що містить значну кількість смолистих речовин, при нагріванні розм'якшується, склеюючи частинки та впливаючи на кінетику коксоутворення і мікроструктуру коксу.

На рис. 1 представлено вплив тиску на міцність вугільного брикету при вмісті кислої смолки 5% (а) та 10% (б). На рис. 1 показано результати брикетування з додаванням 5% (1) кислої смолки при тиску 26, 31 і 35 МПа. За такої концентрації міцність брикету досягає максимуму 37%. Низький вміст в'яжучого не забезпечує повного покриття частинок вугілля, що призводить до утворення пористої структури та недостатньої міцності. На рис. 1 (похила 2) подано дані для 10% смолки при тих самих тисках. У цьому випадку міцність зростає до 48% завдяки більшій кількості зв'язків між вуглецевими частинками. Брикети стають щільнішими, однак все ще залишаються ділянки з неповним зчепленням. За умови додавання 15% кислої смолки та тиску 26–35 МПа міцність брикетів досягає 53%.

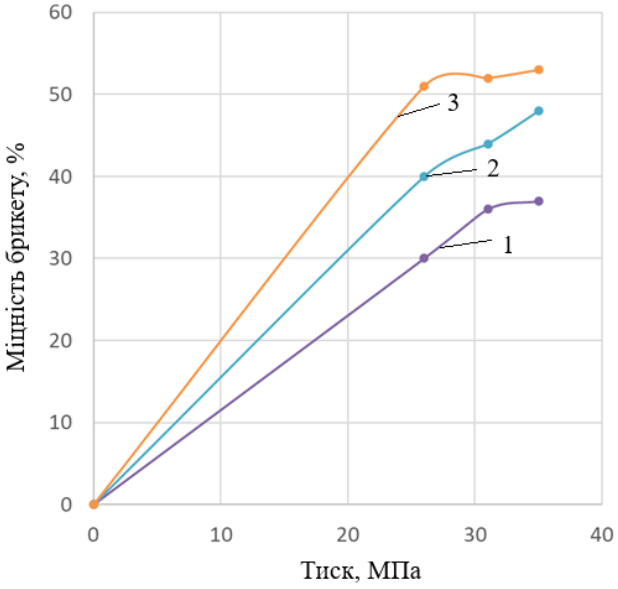


Рис. 1. Вплив тиску на міцність вугільного брикету при вмісті кислої смолки 5–15%
1 – додавання 5% кислої смолки;
2 – 10% кислої смолки; 3 – 15% кислої смолки

Така концентрація забезпечує повне покриття частинок вугілля, утворюючи щільну й однорідну структуру. Максимальна міцність спостерігається при тиску 35 МПа.

На рис. 2 наведено залежність міцності вугільних брикетів від тиску при додаванні фусів у концентрації 5–15%. За вмісту 5% міцність досягає лише 32% через недостатню кількість смолистих речовин для ефективного зчеплення частинок. При 10% фусів міцність зростає до 46%, але структура ще залишається неповністю ущільненою. Максимальна міцність (до 60%) спостерігається при додаванні 15% фусів та тиску 35 МПа – частинки вугілля рівномірно покриваються в'яжучою речовиною, утворюючи щільну структуру.

Результати свідчать про наявність оптимальної концентрації фусів, що забезпечує найкращі властивості брикетів. Надлишок в'яжучого може знижувати міцність через надмірну пластичність і гірше ущільнення. Оптимальні умови: тиск ≥35 МПа, 15% фусів – для досягнення високої механічної міцності.

Висновки. Вугільні брикети широко застосовуються завдяки своїм перевагам – високій теплотворній здатності, зручності транспортування та зберігання. Сучасні підходи до технології брикетування орієнтовані на використання відходів, впровадження екологічно безпечних процесів та пошук нових ефективних в'яжучих компонентів. У даній роботі розглянуто ресурсозберігаючі вдосконалення технології коксування та наведено їх теоретичне обґрунтування.

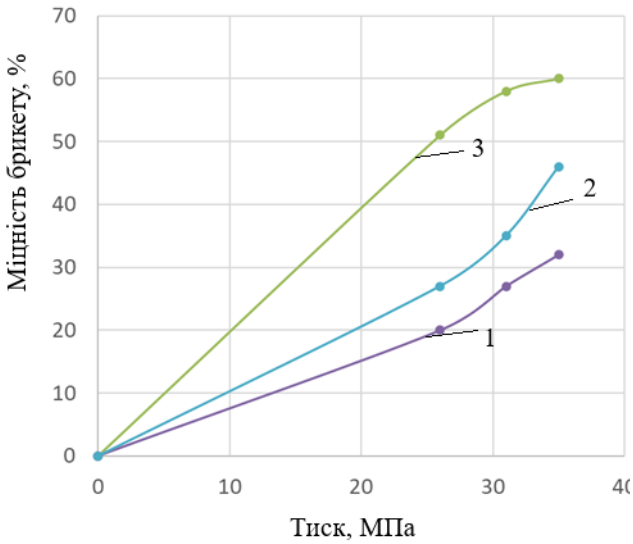


Рис. 2. Вплив додавання концентрації фусів 5–15% на міцність вугільних брикетів
1 – додавання 5% фусів; 2 – додавання 10% фусів; 3 – додавання 15% фусів

Застосування вугільних брикетів у коксуванні дозволяє підвищити ККД, забезпечити стабільність процесу та полегшити експлуатацію коксових печей, що робить запропонований підхід економічно доцільним. Оптимальними умовами формування міцних брикетів є тиск не менше 35 МПа. За такої умови при додаванні 15% кислої смолки досягається міцність до 53%, а при використанні 15% фусів – до 60%. Запропоновані рішення сприяють підвищенню ефективності коксохімічного виробництва та раціональному використанню вторинних ресурсів.

Список літератури:

1. Толстой М. М. Коксохімічна промисловість. *Енциклопедія Сучасної України* / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.]. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2013. URL: https://esu.com.ua/article-8078 (дата звернення 29.05.2025).

2. Попова О., Попов Є. Методичні основи формування пріоритетів розвитку коксохімічної галузі України з застосуванням когнітивних технологій. *Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки.* 2022. № 4. С. 126–131. DOI: https://surl.li/xyjogq

3. Венгер В., Шумська С. Металургійна галузь України: динаміка виробництва крізь призму зовнішніх факторів. *Ринок: прогноз і кон'юнктура. Економіка і прогнозування.* 2021. № 1. С. 7–31. DOI: https://doi.org/10.15407/eip2021.01.007.

4. Zasukha I. P. Carbon-bearing Wastes as the Binders for Coal Briquette Production. *Science Research.* 2021. № 9 (1). P. 1–5. DOI: 10.11648/j.sr.20210901.11.

5. Zhang T., Chen X., Zhao X., Gao Y., Song Y. Preparation of briquette coal with a lubricating oil sludge as binder. *Advances in Engineering Research*. Vol. 170. 7th International Conference on Energy and Environmental Protection. Atlantis Press, 2018. P. 1236–1239.

6. Zhong Q., Yang Y., Li Q., Jiang T. Coal tar pitch and molasses blended binder for production of formed coal briquettes from high volatile coal. *Fuel Processing Technology.* 2017. № 157. P. 12–19. DOI: 10.1016/j.fuproc.\2016.11.005.

7. Khan A. U., Jan Q. M. U., Abas M., Muhammad K., Ali Q. M., Zimon D. Utilization of Biowaste for Sustainable Production of Coal Briquettes. *Energies*. 2023. № 16. P. 7025. DOI: 10.3390/en16207025.

8. Sanka P. M., Germain O., Khalifa L. Production of low emission briquettes from carbonized faecal sludge as an alternative source of cooking energy. *Energy, Sustainability and Society*. 2024. Vol. 14. DOI: 10.1186/s13705-024-00449-0.

9. Carnaje N. P., Talagon R. B., Peralta J. P., Shah K., Paz-Ferreiro J. Development and characterisation of charcoal briquettes from water hyacinth (Eichhornia crassipes)-molasses blend. *PLoS One.* 2018. Vol. 13, № 11. P. e0207135. DOI: 10.1371/journal.pone.0207135.

10. Himbane P. B., Ndiaye L. G., Napoli A., Kobor D. Physicochemical and mechanical properties of biomass coal briquettes produced by artisanal method. *African Journal of Environmental Science and Technology.* 2018. № 12 (12). P. 480–486. DOI: 10.5897/AJEST2018.2568.

11. Blesa M. J., Miranda J. L., Izquierdo M. T., Moliner R. Curing time effect on mechanical strength of smokeless fuel briquettes. *Fuel Processing Technology.* 2003. № 80(2). P. 155–167. DOI: 10.1016/S0378-3820(02)00243-6.

12. Tulepov M. I., Sassykova L. R., Kerimkulova A. R., Mansurov Z. A. Preparation of Coal Briquettes and Determination of Their Physical and Chemical Properties. *Oriental Journal of Chemistry*. 2019. № 35 (1). P. 180–185. DOI: 10.13005/ojc/350120.

13. Burchill P., Hallam G. D., Lowe A. J., Moon N. Studies of coals and binder systems for smokeless fuel briquettes. *Fuel Processing Technology.* 1994. № 41 (1). P. 63–77. DOI: 10.1016/S0378-3820(94)90060-4.

14. Mursito A. T., Arifin W. D. N. Characterization of bio-coal briquettes blended from low quality coal and biomass waste treated by Garant bio-activator and its application for fuel combustion. *Sustainable Energy & Fuels.* 2020. № 7. P. 796–806. DOI: 10.1007/s40789-020-00309-0.

15. Tulepov M., Sassykova L., Kerimkulova A. Preparation of coal briquettes based on non-standard kazakhstan coal with various additives and determination of their quality. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2021. № 56 (1). P. 123–132.

Kryvda R.V., Hatsenko K.V., Byelyanska O.R., Kravchenko O.V. RESEARCH ON BRIQUETTE FORMATION USING ACID TAR AND FUS AS BINDERS

The modern Ukrainian coking industry requires modernization due to outdated technologies that lead to significant resource losses and environmental pollution. A relevant direction is the implementation of resource-saving technologies, particularly the use of coal briquettes, which contributes to waste utilization and increased production efficiency.

The purpose of this work is to study the process of creating coal briquettes using acid tar and fusel oils as effective binders, as well as a comprehensive assessment of their physical and mechanical characteristics, including compressive strength.

Experimental studies were conducted in laboratory conditions to investigate the influence of various concentrations of acid tar and fusel oils on the formation and strength of coal briquettes. Acid tar and fusel oils, being by-products of coking, possess valuable binding properties. When heated, the tar softens, penetrates the coal pores, and forms a strong matrix upon solidification, significantly increasing the strength of the briquettes. Furthermore, fusel oils, due to their high content of resinous substances, not only enhance the strength of briquettes by forming strong resinous bonds between coal particles but also affect the kinetics of coke formation and the microstructure of coke. It is expected that their application will allow for a reduction in specific coal consumption per unit mass of coke, improve coke reactivity, and reduce dust emissions during charging.

It has been established that the optimal pressure for forming strong briquettes is no less than 35 MPa. With the addition of 15% acid tar, the briquette strength reaches up to 53%. When using 15% fusel oils, the strength reaches up to 60%. Studies have shown that a low binder content leads to the formation of a porous structure and insufficient strength, as complete coverage of coal particles is not ensured. At the same time, optimal binder concentrations ensure a dense and homogeneous briquette structure. The results indicate the existence of an optimal concentration of fusel oils that provides the best briquette properties, while an excess of binder can even reduce strength due to excessive plasticity.

The solutions proposed in this work demonstrate high economic feasibility and contribute to increasing the efficiency of coke production, as well as the rational use of valuable secondary resources.

Key words: *coal, briquetting, acidic tar, fus.*

УДК 631.42-044.337:[631.333.92:631.879.4]
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/31

Малиновський В.В.
Український державний університет науки і технологій

Мітіна Н.Б.
Український державний університет науки і технологій

ВПЛИВ БІОПРЕПАРАТІВ НА ЯКІСТЬ КОМПОСТУ ПРИ ТЕХНОЛОГІЇ АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ

В роботі описано технологію аеробного компостування підстилкового гною великої рогатої худоби (ВРХ) у промислових умовах. Проведене дослідження показало, що додавання до існуючої мікрофлори субстрату ВРХ штамів бактерій та мікроміцетів (біопрепаратів) суттєво впливає на процес аеробного компостування, хімічні показники готового компосту (покращувача ґрунту або органо-мінерального добрива). Досліджували три сформованих експериментальних бурти субстрату в які додавались два види біопрепаратів поширених виробників України. Технологічний контроль процесу аеробного компостування гною ВРХ, для отримання стабільного стану компосту, здійснювали протягом 56 діб. Експериментально доведено, що додавання біопрепаратів можуть скорочувати, збільшувати і блокувати основні фази процесу промислового аеробного компостування субстрату на основі підстилкового гною ВРХ. Додавання біопрепарату № 1 заблокувало термофільну фазу, залишивши ризики збереження патогенів та життєздатного насіння бур'янів. Застосований біопрепарат № 2 фактично з першого дня увійшов у термофільну фазу. Масова частка органічної речовини в бурті-2 збільшилась на 18,9%, в бурті-3 (з додаванням біопрепарату № 2) зменшилась на 61% відносно контролю. Загальний вуглець у бурті-2 з додаванням групи біопрепаратів № 1 збільшився на 46,3 г/кг, в бурті-3 (з додаванням біопрепарату № 2) зменшився на 275 г/кг. В бурті-3 (з додаванням біопрепарату № 2): зниження в 1,68 рази N та в 1,33 рази K2O; в бурті-2 (з додаванням біопрепарату № 1): у 1,1 рази підвищився P2O5, в 1,12 рази знизився K2O та в 1,35 N відносно контролю. Проведене дослідження ставить під сумнів можливість здійснення процесу аеробного компостування у промислових обсягах та доцільність використання досліджених біопрепаратів для отримання доброякісного компосту. Зазначено, що для відібраного типу субстрату повинно бути розроблено біопрепарат зі спеціальним складом мікроорганізмів, вплив якого дасть можливість переробнику отримати прогнозовані економічний ефект та кінцевий продукт. Дослідження підтверджує на необхідність експертного контролю та введення чітких вимог, правил, норм та стандартів щодо застосування конкретних штамів мікроорганізмів у біопрепаратах для технології аеробного компостування у промислових об'ємах перероблення, складу субстратів та вимог переробників щодо отримання готового продукту відповідної якості.

Ключові слова: *аеробне компостування, хімічні показники готового компосту, компост, додавання біопрепаратів для компостування, покращувач ґрунту, промислове компостування, біопрепарати в компостуванні, застосування біопрепаратів в компостуванні, вплив біопрепаратів на компостування, bacillus в компостуванні, переробка відходів тваринництва, органічні добрива, покращувач ґрунту, мікробіота ґрунту, мікробіофіт органік компостування, компоназа.*

Постановка проблеми. Світові втрати екосистемних послуг внаслідок зміни ґрунтового покриву за період з 1997 по 2011 рр. склали від 3,5 до 18,5 трлн євро, а в наслідок деградації земель ще втрачено приблизно 5,5–10,5 трлн євро на рік. Зниження врожайності сільськогосподарських земель є наслідком втрати біорізноманіття ґрунту. Втрата біорізноманіття призводить до зниження вилову риби, зростання економічних витрат від повеней та інших катаклізмів, збитків потенційно нових джерел для медицини [1, с. 11]. Орієнтовні щорічні світові втрати родючого шару ґрунту сягають 600 млн тонн, зокрема гумусу до 20 млн тонн, для компенсації якого потрібно вносити 300–350 млн тонн традиційних добрив, в той час, як у 1986–1990 рр. їх всього вироблялось близько 250 млн тонн [2, с. 680].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відновлення родючого шару ґрунту, можливо за рахунок виробництва покарщувача ґрунту з вторинних продуктів тваринництва рослинництва та птахівництва шляхом промислового аеробного

компостування [3, с. 186–192]. Цінність джерела органічної та діючої речовини як гній великої рогатої худоби є незаперечною, але непереробленний гній може містить в собі хімічні елементи в агресивній та малодоступній для рослин формі, хвороби, шкідників, патогени, важкі метали, лікарські препарати, активне насіння бур'янів тощо. Стратегія охорони довкілля Європи в частині перероблення гною великої рогатої худоби (ВРХ) віддає перевагу саме аеробному компостуванню як найбільш безпечного для довкілля, ефективної та економічно привабливої технології.

Як свідчать дані аналітичного звіту асоціації виробників молока України за попередніми даними Держстату, станом на 1 листопада 2023 року в присадибному і промисловому секторі Україні утримується 2 млн 406,1 тис. голів ВРХ, у тому числі 1 млн 320,3 тис. корів [4]. Розподіл поголів'я між присадибним та агропромисловим секторами України зображено на рисунку 1.

Рис. 1. Кількісні показники утримання ВРХ у секторах України (тис./голів)

Загальна маса органічних відходів у вигляді підстилкового гною від утримання такої кількості худоби складає орієнтовно 24,06 млн. тонн на рік. Від ступені дотримання технології аеробного компостування, обладнання, що використовується, якості та включень у склад субстрату первинної сировини залежить характеристика кінцевого продукту. Продуктом перероблення може бути як органічне добриво, покращувач ґрунту, будівельний матеріал так і частково утилізовані відходи, які потребують вторинної переробки. Звичайно, фермерські господарства зацікавлені в першу чергу в отриманні компосту (органо-мінерального добрива) з максимальними показниками основних діючих речовин: азот, калій, фосфор (NPK). Органічний складник такого компосту працює на покращення мікробіоти ґрунту, а хімічна частина допомагає заощадити на мінеральних добривах підживлює та стимулює зростанню рослин.

Паралельно з розвитком технології промислового аеробного компостування розвивається напрямок виробництва біопрепаратів, штамів бактерій та мікроміцетів дія яких, по затвердженню виробників, направлена на стимуляцію процесів аеробного компостування. Проте аеробне компостування з метою утилізації та з метою отримання органо-мінерального добрива з очікуваними біохімічними показниками – це різні завдання. Думки операторів – переробників можна умовно розділити на дві категорії. Перша категорія підкреслює, що для отримання покращувача мікробіоти ґрунту додавання біопрепаратів не є доцільним, а базова сировина, зокрема підстилкового гною ВРХ, є самодостатньою для отримання якісного компосту. Друга категорія стверджує, що додавання біопрепаратів стимулює процеси компостування, що призводить до скорочення термінів аеробного компостування та покращує якість кінцевого продукту – компосту.

Опираючись на технічний звіт № II для Європейської Комісії щодо діяльності з перероблення гною в Європі в частині загальної ефективності добавок в процесі перероблення гною та використання його у господарстві виникає велике питання з отримання прогнозованих та стабільних показників кінцевого продукту переробки. Сьогодні на ринку є багато добавок до гною, але їхня ефективність була продемонстрована не в кожному випадку. Однією з основних проблем є відсутність стандартних методик для тестування та аналізу результатів. Інша проблема з їх використанням полягає в тому, що багато випробувань були розроблені лише в експериментальних лабораторіях, а не на фермах, де можна знайти великі варіації в харчуванні, методах утримання тварин, що впливало на склад та активність базового субстрату. Крім того, іноді існує величезний обсяг гною, який потрібно змішати з добавкою в ямі або відстійнику, і досягнуті результати часто залежать набагато більше від ефективності змішування, ніж від ефективності добавки. Ефективність кожної сполуки значною мірою залежить від правильного дозування, вибору часу для операцій аеробного компостування і ретельного змішування. У деяких випадках спостерігався невеликий ефект збільшення цінності добрива, пов'язаний з типом культури, часом внесення і дозуванням. Слід підкреслити, що в багатьох випадках вплив добавок на здоров'я людей і тварин або інші екологічні наслідки використання добавок невідомі, і це, звичайно, обмежує їх застосування [5, с. 53–54].

Існують науково-методичні рекомендації в яких обґрунтовано принципи компостування органічної речовини за інтродукції мікроорганізмів, відповідно до особливостей сукцесійних змін у мікробних угрупованнях компостованих субстратів. Авторами наведено технологічні параметри біокомпостування пташиного посліду за інтродукції активного деструктора органічної речовини *Trichoderma harzianum* PD3. Визначено оптимальний для інтродукції мікроміцетів період компостування, його кількість, умови аерації, за яких відбувається активна мінералізація органічного субстрату, що дозволяє зменшити терміни компостування та отримати ефективне біоорганічне добриво [6, с. 2].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження впливу біопрепаратів на процес промислового аеробного компостування підстилкового гною великої рогатої худоби та біохімічні показники отриманого компосту (органічна складова, рівень pH та діюча речовина N, P_2O5, K_2O).

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є підстилковий гній великої рогатої худоби, який уявляє собою складну полідисперсну систему, що включає тверді, рідкі та газоподібні компоненти; біопрепарати з певним складом мікроорганізмів. Для дослідження обрано двох українських виробників біопрепаратів, які щонайбільше застосовують в Україні при промисловому аеробному компостуванні вторинних відходів тваринництва та птахівництва. Склади штамів груп біопрепаратів що додавалися у базовий субстрат наведені у двох групах:

Група біопрепаратів № 1 (ТУ У 20.1-03754120-005:2020) виробник товариство з обмеженою відповідальністю Агрофірма «Колос», Україна) [7, 8]:

a) Bacillus subtilis 1 IMB B-7467, Bacillus pumilus 1 IMB B-7523, Bacillus megaterium 1 IMB B-7482, Bacillus mucilaginosus «Колос» IMB B-7600, Azotobacter croococcum IMB B-7599, Pseudomonas sp.21 IMB B-7480 – до $1{,}0 \cdot 10^9$ КУО в 1 мл;

b) Bacillus subtilis 1 IMB B-7467 – до $1{,}0 \cdot 10^9$ КУО в 1 мл;

c) Bacillus subtilis 1 IMB B-7467, Bacillus pumilus 1 IMB B-7523, Bacillus megaterium 1 IMB B-7482, Bacillus mucilaginosus «Колос» IMB B-7600, Bacillus sp.1b «Колос» IMB B-7680, Azotobacter croococcum IMB B-7599, Pseudomonas sp.21 IMB B-7480, Trichoderma sp. IMB F-100101, Trichoderma viride IMB F-100123, Trichoderma citrinoviride IMB F-100124, Trichoderma harzianum IMB F-100125 – до $1{,}0 \cdot 10^9$ КУО в 1 мл;

Група біопрепаратів № 2 (ТУ У 24.1-30165603-020:2010) виробник БТУ-ЦЕНТР, Україна [9]:

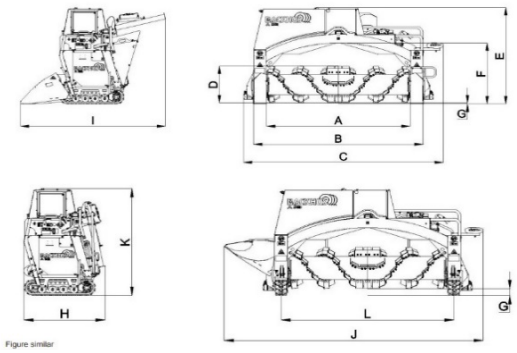
a) гриби роду Trichoderma, життєздатні ефективні бактерії Bacillus subtilis, Rodex, Azotobacter chroococcum, Enterobacter, Enterococcus faecium та ін. у кількості не менше ніж $1{,}0 \times 10^9$ КУО/см^3.

Технічну та технологічну підтримку проведення експерименту надала компанія ТОВ «О.П.Є.». В процесі аеробного компостування використовували спеціальну техніку: самохідний аератор BACKHUS A30. Технічні характеристики аератора наведені на рисунку 2.

Самохідний аератор убезпечував функції сушіння, змішування, подрібнення, насичення киснем, зволоження субстратів та рівномірне внесення біопрепаратів. Телескопічний навантажувач (Manitu MLT X735) використовували у формуванні буртів з субстрату, рисунок 3.

Загальний вигляд аератора та процес зволоження буртів на ланках технологічного процесу поводили за допомогою самохідного аератора BACKHUS A30 та тягача CLAAS XERION 5000 з діжкою для води на 8 т., рисунки 4–5.

Аналіз змін в субстратах аеробного компостування визначали в польових умовах візуально, замірами основних показників. Температуру вимірювали біметалевим термометром для компосту TFA 192008, рисунок 6.



Dimensions work			A 30
rotor diameter	D	in	28.7
length	I	ft	8.5
width	C	ft	11.6
height	E	ft	6.2
clearance width	A	ft	8.4
clearance height	F	ft	3.9
minimum ground clearance	G	in	0.4
maximum ground clearance	G	in	3.9
Dimensions transport			**A 30**
transport width	H	ft	4.4
transport length	J	ft	13.8
transport height	K	ft	6.2
track width	L	ft	9.2
turning diameter		ft	13.1
speed forwards and backwards		ft/min	0 - 164
weight up to**		t	1.9
maximum ground pressure**		psi	8.39

Рис. 2. Технічні характеристики аератора BACKHUS A30

а) формування буртів b) вигляд буртів після третьої аерації

Рис. 3. Формування буртів за допомогою телескопічного навантажувача Manitu MLT X735

Рис. 4. Загальний вигляд аератора для компостування BACKHUS A30

Рис. 5. Зволоження буртів за допомогою тягача з діжкою CLAAS

а) журнал фіксації замірів та біметалевий термометр

b) замір показників в експериментальному бурті

Рис. 6. Контроль основних показників в процесі аеробного компостування

Для вимірювання кислотності та вологості використовували аналізатор ґрунту ZD-05 (PH 3–8; RH: 10–80%); перевірку показників pH робили з допомогою індикаторних смужок на pH 4,0–7,5 JTP pH Indicator Strips (125.2C); аналіз хімічного складу початкового субстрату та зрілого компосту здійснювали за ДСТУ ISO 10012:2005.

Виклад основного матеріалу. Дослідження орієнтоване на вивчення впливу біопрепаратів у процесі промислового аеробного компостування. Експеримент проводили у промислових умовах на відкритому ґрунті. Сировинна база надана фермерським господарством України що розташоване в Київській області (Україна) за координатами 50.043342902046504, 31.568016477994775. Щодо обраних для експерименту біопрепаратів, за даними виробника [7, 8], дія групи біопрепаратів № 1 направлена на активацію процесів знезараження та розщеплення органічної речовини компостуючого субстрату з метою виробництва органічних, органо-мінеральних добрив. На сайті партнера виробника біопрепаратів № 1 більше детально описано очікуваний ефект від застосування біопрепаратів у промисловому аеробному компостуванні, а саме біопрепарати сприяють усуненню неприємного запаху, нейтралізації токсичних речовин, зменшенню об'єму органічних відходів до 40%; дозволяють отримувати цінне органічне добриво; пригнічують розвиток патогенних бактерій завдяки дії мікроорганізмів-антагоністів; прискорюють процес розкладання органічних відходів; збагачують ґрунт поживними речовинами, покращують його структуру та родючість [7, 8].

По ствердженню виробника [9], дія біопрепарату № 2 обраного для дослідження при застосуванні у промисловому аеробному компостуванні орієнтована на прискорення розкладання органічних відходів. Деструкція, знезараження побічної продукції та ефективне аеробне компостування до 1,5–2 місяців. Біопрепарат сприяє збільшенню цінності субстрату завдяки збільшенню в ньому вмісту NPK у доступній для рослин формі, зменшує виділення аміаку та неприємного запаху, безпечний для людини та навколишнього середовища [9].

Результати роботи. Для проведення дослідження сформовано три бурти. Лінійні параметри та вага експериментальних буртів для аеробного компостування наведені в таблиці № 1.

За контрольний прийнято бурт № 1 в якому процес аеробного компостування здійснювався за класичною технологією: контроль та регулювання основних параметрів (вологість, температура, рівень кисню, без додавання біопрепаратів). Біопрепарати № 1 та № 2 вносили у рекомендованому виробниками дозуванні та з дотриманням часових проміжків згідно з рекомендаціями.

В дослідженні за базовий субстрат обрано підстилковий (твердий) гній великої рогатої худоби зі вмістом 30% соломи, 70% гною (сеча + вода). Досліджений хімічний склад базового субстрату наведено в таблиці № 2.

Таблиця 2

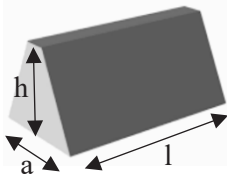
Результат дослідження базового субстрату на хімічний склад

Показник	Фактичний вміст, г/кг
Масова частка сухої речовини	283,00
Масова частка органічної речовини	615,00
Загального вуглецю (Сзаг)	272,30
N	7,6
P2O5	3,7
K2O	9,9
Співвідношення C:N	10:1
Кислотно-лужний баланс, pH	9,20

Порівняння біохімічних показників отриманого компосту без додавання та з додаванням біопрепаратів різних типів, технологічний контроль процесу промислового аеробного компостування на відкритому ґрунті, здійснювали протягом 56 діб. В процесі аеробного компостування в бурті 2 з додаванням групи біопрепаратів № 1 не було досягнуто необхідних

Таблиця 1

Лінійні параметри буртів субстратів

Означення лінійних параметрів	Маркування експериментальних буртів	a, м	h, м	l, м	Початкова вага бурта, т
	Бурт № 1 (контроль)	3,0	1,2	40,5	58,0
	Бурт № 2 (з додаванням групи біопрепаратів № 1)	3,0	1,2	57,0	81,62
	Бурт № 3 (з додаванням групи біопрепаратів № 2)	3,0	1,2	51,0	73,03

температур (≥60°С) для знезараження субстрату у термофільній фазі, що підвищує ризик збереження патогенів, хвороби та життєздатного насіння бур'янів, тоді як в буртах 1 та 3 процес знезараження пройшов з дотриманням необхідних температур та термінів, що показано на рисунку 7.

З рисунка 7 бачимо, що у бурті 1 температура поступово збільшувалась від 26°С до 64,5°С, у бурті 2 процес переходу у термофільну фазу відсутній (максимальна зафіксована температура 54°С), у бурті 3 перша – мезофільна фаза відсутня, після внесення біопрепарату температура зросла лише з 26°С до 56°С за добу.

Зафіксовано суттєве зниження вологості в бурті 3 з додаванням групи біопрепаратів № 2, що у своєю чергою вимусило проведення додаткових операцій з внесенням води, перемішування, що збільшує собівартість переробки та отриманого компосту, тоді як в буртах 1 та 2 процес зміни показників вологості приблизно однакові (рис. 8).

Основним покращувачем мікробіоти ґрунту в компості є вміст органічної речовини. Другим, не менш важливою у якості компосту є хімічна складова (N, P_2O_5, K_2O), саме за ці показники борються переробники вторинних продуктів тваринництва в агропромисловому комплексі. Хімічні показники результату аеробного компостування трьох експериментальних буртів наведено у таблиці 3.

Масова частка органічної речовини в бурті-2 збільшилась на 18,9%, в бурті-3 (з додаванням біопрепарату № 2) зменшилась на 61% відносно контролю. Загальний вуглець збільшився у бурті-2 з додаванням групи біопрепаратів № 1 на 46,3 г/кг у бурті 3 зменшилось на 275 г/кг. Суттєве зниження NPK щодо показників зафіксованих у бурті-3 з додаванням біопрепарату № 2: у 1,68 рази N та у 1,33 рази K_2O; у бурті-2: у 1,096 рази підвищився P_2O_5, у 1,12 рази знизився K_2O та у 1,35 N. Аналіз даних ставить питання щодо застосування біопрепарату № 2

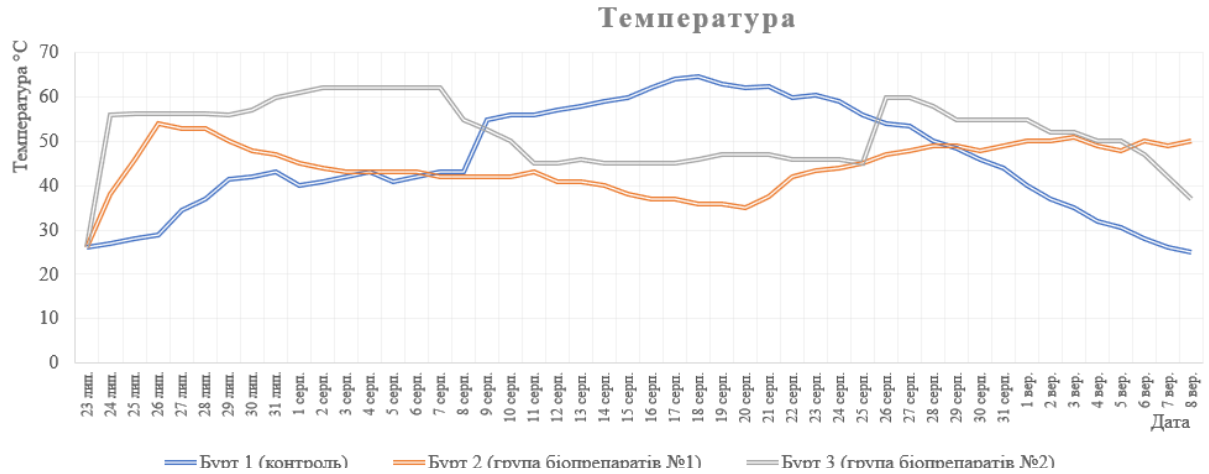


Рис. 7. Параметри зміни показників температури субстрату в процесі аеробного компостування

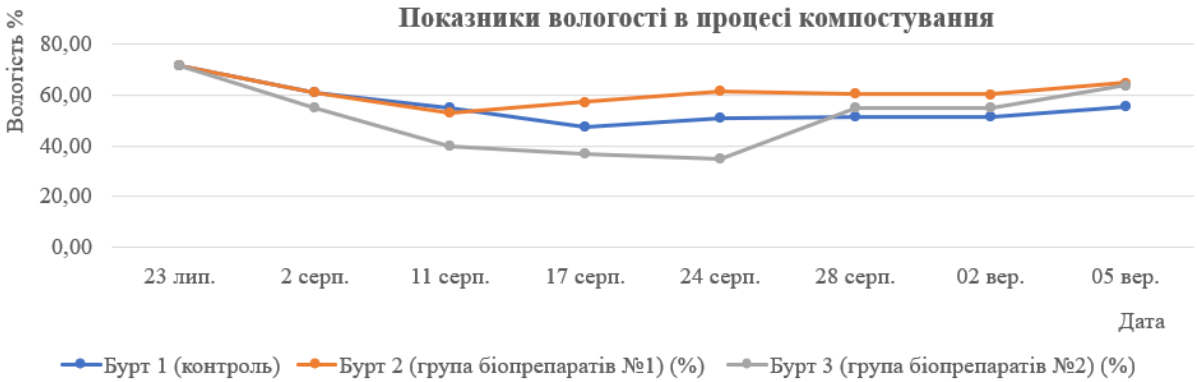


Рис. 8. Параметри зміни показників вологості субстрату в процесі аеробного компостування

Таблиця 3

Хімічні показники отриманого компосту

Показники	Бурт № 1 (контрольний) без додавання біопрепаратів, г/кг	Бурт 2 з додаванням групи біопрепаратів № 1, г/кг	Бурт 3 з додаванням групи біопрепаратів № 2, г/кг
Масова частка сухої речовини	446,8	351,5	696,9
Масова частка органічної речовини	450,0	535	175,0
Загальний вуглець(Сзаг)	194,7	241	95,8
N	8,4	6,2	5,0
P2O5	5,2	5,7	5,2
K2O	14,4	12,9	10,8

у процесі аеробного компостування ВРХ; необхідність вивчення внесення окремих штамів мікроорганізмів, їх вплив на блокування фаз аеробного компостування. Отже, додавання до наявної мікрофлори субстрату ВРХ штамів бактерій та мікроміцетів (біопрепаратів) суттєво впливає на процес аеробного компостування, хімічні показники готового продукту (покращувача ґрунту або органо-мінерального добрива). Можемо припустити, що для кожного типу субстрату, а саме його хімічного складу, повинен бути підібраний конкретний склад штамів мікроорганізмів біопрепарату, вплив, якого дасть можливість переробнику отримати саме той економічний ефект та продукт на який він розраховує.

Висновки.

1. Визначено, що додавання біопрепаратів № 1, № 2 впливають на процес компостування субстрату ВРХ: скорочують, збільшують або зовсім блокують основні фази процесу аеробного компостування.

2. Застосування біопрепаратів при аеробному компостуванні ВРХ показало, що масова частка органічної речовини в бурті-2 збільшилась на 18,9%, в бурті-3 зменшилась на 61% відносно контролю. Загальний вуглець збільшився у бурті-2 з додаванням групи біопрепаратів № 1 на 46,3 г/кг, в бурті-3 з додаванням групи біопрепаратів № 2 зменшився на 83,93 г/кг відносно контролю. Зниження показників зафіксовані в бурті-3 з додаванням біопрепарату № 2: в 1,68 рази N та в 1,33 рази K_2O; в бурті-2: у 1,096 рази підвищився P_2O_5, в 1,12 рази знизився K_2O та в 1,35 N відносно контролю.

3. Проведений експеримент ставить під сумнів можливість здійснення процесу аеробного компостування у промислових обсягах та доцільність використання біопрепаратів у випадку коли на меті є отримання компосту, який буде використано як покращувач ґрунту або органічне добриво в землеробстві.

4. Дослідження підтверджує на необхідність експертного контролю та введення чітких вимог, правил, норм та стандартів застосування конкретних штамів біопрепаратів для конкретних типів субстратів та вимог переробників щодо властивостей цільового продукту.

Фінансування. Проведене дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Подяки. ПП «ЕВРОСЕМ» за надання сировини, необхідної техніки, та можливості проведення наукового дослідження на виробничій ділянці свого підприємства. ТОВ «О.П.Є.» за консультування, проведення необхідних операцій в технологічному процесі промислового аеробного компостування на відкритому майданчику. Асоціації «Компосту» за консультації.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури:

1. Стратегія біорізноманіття ЄС до 2030 року: повернення природи у наше життя, м. Брюссель, 20.05.2020 COM (2020) 380 final – 11 с.

2. Шикула М.К. Відтворення родючості ґрунтів у ґрунтозахисному землеробстві. Наукова монографія/ НАУ. Київ: ПФ. Оранта, 1998. 680 с.

3. Малиновський В.В., Мітіна Н.Б., Технологія отримання покращувача ґрунту шляхом аеробного компостування, Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Серія: Технічні науки, Том 35 (74) № 6. 2024. С. 186–192.

4. Георгій Кухалейшвілі, Аналітичний звіт. Асоціація виробників молока України. листопад 2023 року. Джерело: дослідження АВМ за даними Держстату. Доступно в Інтернеті: https://avm-ua.org/uk/post/pogoliva-vrh-skorotilosa-na-79-v-zovtni-2023-roku

5. Manure Processing Activities in Europe – Project reference: ENV.B.1/ETU/2010/0007, Technical Report No. II to the European Commission, Directorate General Environment, 28-10-2011. С. 53–54.

6. Науково-методичні рекомендації «Мікробіологічні аспекти технології компостування органічної речовини на основі пташиного посліду за інтродукції мікроміцету Trichoderma harzianum PD3 (Rifai), Національна академія аграрних наук України інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва, укладачі: С. Б. Дімова, В. В. Волкогон, А. М. Москаленко, С. М. Деркач, Ю. М. Халеп, Н. В. Луценко, Н. П. Штанько, І. А. Земська. Чернігів : видавець Брагинець О. В., 2020р. 2 с.

7. Посилання на сайт виробника першої групи біопрепаратів яка була застосовано у дослідженні. URL: https://www.agrokolos.com.ua/katalog1

8. Посилання на сайт партнера виробника першої групи біопрепаратів яка була застосовано у дослідженні. URL: https://waste.organic/bio.html

9. Посилання на сайт виробника другого біопрепарату який був застосований у дослідженні URL: https://componaza.btu-center.com/#rec500021518

Malynovskyi V.V., Mitina N.B. INFLUENCE OF BIOLOGICAL PRODUCTS ON THE QUALITY OF COMPOSTS WHEN USING THE TECHNOLOGY OF AEROBIC COMPOSTING

The article describes the technology of aerobic composting of cattle bedding manure in industrial conditions. The study has shown that the addition of bacterial strains and micromycetes (*biological products*) *to the existing microflora of the cattle substrate significantly affects the aerobic composting process and the chemical properties of the finished compost* (*soil improver or organic-mineral fertilizer*)*. Three experimental substrate piles were formed and supplemented with two types of biological products from common Ukrainian manufacturers. Technological control of the aerobic composting process of cattle manure to obtain a stable compost state was carried out for 56 days. It has been experimentally proven that the addition of biological products can reduce, increase and block the main phases of the industrial aerobic composting process of the substrate based on cattle bedding manure. The addition of biological product No. 1 blocked the thermophilic phase, leaving the risks of pathogens and viable weed seeds. The applied biological preparation No. 2 actually entered the thermophilic phase from the first day. The mass fraction of organic matter in heap 2 increased by 18.9%, in heap 3* (*with the addition of biological product № 2*) *decreased by 61% compared to the control. Total carbon in pit 2 with the addition of biological product of group 1 increased by 46.3 g/kg, in pit 3* (*with the addition of biological product 2*) *decreased by 275 g/kg. In pit 3* (*with the addition of biological product № 2*)*: a 1.68-fold decrease in N and a 1.33-fold decrease in K2O; in pit 2* (*with the addition of biological product № 1*)*: a 1.1-fold increase in P2O5, a 1.12-fold decrease in K2O, and a 1.35-fold decrease in N compared to the control. The study calls into question the possibility of conducting a controlled and predictable aerobic composting process on an industrial scale using the studied biological products to produce high-quality compost. It is noted that for each selected type of substrate, a separate biological preparation with a special composition of microorganisms should be developed, the action of which will allow the processor to obtain the predicted economic effect and the final product with the predicted indicators. The study confirms the need for expert control and implementation of clear requirements, rules, norms and standards for the use of specific strains of microorganisms in biological products for aerobic composting technology in industrial volumes, the composition of substrates and the requirements of processors to obtain a finished product of appropriate quality.*

Key words: *aerobic composting, chemical parameters of the finished compost, compost, addition of biological products for composting, soil improver, industrial composting, biological products in composting, use of biological products in composting, influence of biological products on composting, bacillus in composting, animal waste processing, organic fertilizers, soil improver, soil microbiota, microbiophyte organic composting, componase.*

УДК 67.06:666.9.022.1
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/32

Мельник Л.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Береговий Т.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СТРУКТУРНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИТІВ ІЗ ЗОЛОЮ ВИНОСУ ТЕС

У статті представлено результати експериментального та теоретичного дослідження теплофізичних властивостей полімерних композитів, модифікованих золою виносу теплоелектростанцій (ТЕС), зокрема Бурштинської та Курахівської. Метою роботи було встановлення впливу типу золи, її концентрації, полімерної матриці, густини, пористості та температури на ефективну теплопровідність композитів. Як полімерну основу застосовано водні дисперсії акрилового типу (Policril 590) та стирол-бутадієнового типу (Latex 2012). Дослідження проводилися для зразків із вмістом золи 65 та 90 мас.%, у температурному діапазоні 150–375 К.

Встановлено, що композити з золою Курахівської ТЕС демонструють вищу теплопровідність порівняно з аналогами на основі золи Бурштинської ТЕС. Це зумовлено вищою густиною, більшим розміром кристалітів та меншою питомою поверхнею Курахівської золи, що сприяє формуванню більш ефективної теплопровідної структури. Показано, що збільшення густини композиту супроводжується підвищенням теплопровідності, а зростання пористості – її зниженням. Композити на основі Policril 590 виявились ефективнішими за показниками теплопровідності, що пояснюється кращою міжфазною взаємодією та змочуваністю поверхні золи акриловою матрицею.

Для оцінки результатів було застосовано перколяційну модель і модель Хашина–Штрикмана (нижня межа). Експериментальні значення суттєво перевищують розраховані, що свідчить про утворення структурних теплопровідних каналів завдяки щільному пакуванню частинок золи та їх агрегації. Установлено, що модель Хашина–Штрикмана забезпечує найбільш обґрунтовану нижню межу прогнозу теплопровідності для систем із середнім рівнем наповнення, і може бути використана як інструмент для первинного проектування складу теплоізоляційних матеріалів.

Проведений аналіз підтверджує перспективність використання зол виносу ТЕС як ефективного мінерального наповнювача для створення полімерних композиційних матеріалів з регульованими теплофізичними властивостями. Отримані дані можуть бути основою для подальшої оптимізації складів, зокрема через хімічну або фізико-механічну модифікацію золи, регулювання пористості, вибір дисперсної фази та застосування гібридних наповнювачів з метою створення енергоефективних екологічно орієнтованих матеріалів нового покоління.

Ключові слова: *композит, наповнювач, зола виносу, теплопровідність, модель Хашина–Штрикмана.*

Постановка проблеми. Золи виносу, що утворюються в значних обсягах на теплоелектростанціях, становлять одну з наймасовіших груп техногенних відходів, які вимагають екологічно безпечної утилізації. Попри хімічну інертність і мінеральну природу, більшість зол накопичується у золовідвалах, створюючи додаткове навантаження на навколишнє середовище та забруднюючи повітря, ґрунт і водні ресурси. У зв'язку з цим особливого значення набуває розроблення ефективних напрямів переробки зол виносу як вторинної сировини, зокрема у складі будівельних та теплоізоляційних полімерних матеріалів.

Одним з перспективних шляхів є використання зол як наповнювачів у полімерних композиційних матеріалах на основі водних дисперсій. Такі системи поєднують низьку собівартість, екологічну безпечність і технологічну гнучкість, що відкриває можливості для створення нових теплоізоляційних покриттів. Однак теплофізичні характеристики композитів істотно залежать як від типу використаної золи (її хімічного складу, питомої поверхні, густини), так і від природи полімерної матриці. Недостатня вивченість цих взаємозв'язків, зокрема для зол виносу Бурштинської та Курахівської ТЕС у поєднанні

з акриловими та стирол-бутадієновими латексами, ускладнює науково обґрунтований підхід до розробки ефективних композицій.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є встановлення закономірностей впливу типу золи виносу та полімерної матриці на теплофізичні властивості композиційних матеріалів з метою оптимізації їх складу для використання в системах теплоізоляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання золи виносу теплоелектростанцій (ТЕС) як функціонального наповнювача у складі полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) привертає зростаючу увагу наукової спільноти, що зумовлено як масштабами її утворення, так і перспективами утилізації цього техногенного відходу в галузі будівництва, енергозбереження та екологічно орієнтованих технологій. Основна увага приділяється підвищенню ефективності теплоізоляційних властивостей таких композитів за рахунок заміщення частини полімерної матриці техногенними наповнювачами, зокрема золою виносу.

Останні дослідження показують, що вплив золи на теплопровідність композитів є складним і суперечливим, оскільки залежить від кількох взаємопов'язаних факторів: природи полімерної матриці, концентрації наповнювача, дисперсності частинок, пористості структури та ступеня взаємодії на міжфазній межі.

Згідно з дослідженням [1], додавання 10–20 мас.% золи ТЕС до полістирольного бетону призводить до зростання теплопровідності на 8–12% за рахунок утворення теплопровідних каналів. Методом стаціонарного теплового потоку доведено доцільність застосування таких композитів у будівництві. Подібні висновки зробили автори у роботі [2], які досліджували поліетиленові композити: при вмісті золи 5–15 мас.% спостерігалося підвищення теплопровідності на 10%, тоді як за перевищення цього рівня показник знижувався внаслідок агломерації частинок. У роботі [3] додатково показано, що включення армувальних волокон у гібридні композити із золою підвищує теплопровідність на 5–7% та покращує мікроструктурну стабільність матеріалу. Для композитів на основі поліпропілену аналогічні результати наведено в дослідженні [4]: теплопровідність зростала до концентрації 15 мас.% золи, однак при 30 мас.% відбувалося її зниження внаслідок зростання пористості.

Окрему групу становлять дослідження, засновані на чисельному моделюванні. У роботі [5] використано молекулярно-динамічне моделювання з застосуванням програмного середовища LAMMPS та силових полів COMPASS. Показано, що наночастинки золи (менше 1 мкм) можуть підвищувати теплопровідність композиту до 15%, проте обмеженням таких моделей залишається ідеалізація структури без урахування дефектів. Інше дослідження [6] підтверджує зниження теплопровідності термопластичних композитів із золою на 15–20% при підвищенні концентрації до 30 мас.% через переважання аморфної фази золи.

З позиції прикладного матеріалознавства важливими є публікації, що висвітлюють екологічні аспекти. Наприклад, у дослідженні [7] зазначено, що використання золи ТЕС у полімерних композитах сприяє зниженню тепловтрат у будівлях на 10–15% і забезпечує зменшення витрат на опалення. Проте слід враховувати, що довговічність властивостей таких матеріалів залежить від умов експлуатації. Так, в дослідженні [8] показано, що після впливу УФ-випромінювання та вологи теплопровідність HDPE-композитів із золою знижується на 5–9% внаслідок деградації інтерфейсу між наповнювачем та матрицею. Актуальним є також напрям гібридних систем, як зазначено в матеріалах роботі [9] поєднання золи ТЕС з графеном дає змогу підвищити теплопровідність на 20% порівняно з традиційними зольними композитами.

Таким чином, більшість публікацій підтверджують, що зола ТЕС може відігравати подвійну роль: з одного боку, знижувати теплопровідність для теплоізоляції, а з іншого – підвищувати її при відповідному підборі матриці та режимів обробки. Ключовими факторами залишаються концентрація золи, її морфологія, дисперсність, а також поверхнева взаємодія з полімерною фазою. У контексті виявлених наукових суперечностей та практичних обмежень актуальним є не лише подальше дослідження впливу довготривалого старіння, а й експериментальна перевірка закономірностей зміни теплопровідності полімерних композитів із золою ТЕС залежно від типу золи, її концентрації, температури та полімерної матриці, що і було покладено в основу наших досліджень.

Постановка завдання. Аналіз літературних джерел засвідчив наявність суперечливих даних щодо впливу золи теплоелектростанцій на теплопровідність полімерних композитів, що зумовлено відмінностями у хімічному та фазовому складі золи, розмірі частинок, ступені

диспергування, типі полімерної матриці, концентрації наповнювача, а також структурними факторами, зокрема густиною та пористістю матеріалу. Крім того, актуальним є питання впливу температури на теплопровідність таких композитів, зокрема в умовах реальної експлуатації, а також вибору полімерного зв'язуючого, яке забезпечує найкращу взаємодію з частинками золи.

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу типу золи ТЕС, її концентрації, типу полімерної дисперсії, густини, пористості та температури на теплопровідність полімерних композитів, а також аналіз ролі міжфазної взаємодії у формуванні теплоізоляційних властивостей матеріалу. Дослідження спрямоване на створення наукових засад для керування структурою та теплопровідністю композитів у заданому температурному діапазоні.

Досягнення цієї мети передбачає експериментальне дослідження теплофізичних властивостей композитів із використанням золи різного походження при варіації їх вмісту та температурного навантаження, аналіз взаємодії між компонентами матеріалу та оцінку ролі структурних характеристик у процесах теплопередачі.

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження теплофізичних властивостей полімерних композитів із мінеральним наповнювачем було використано золошлакові матеріали з двох українських теплоелектростанцій – Бурштинської (зола Б) та Курахівської (зола К). Вибір цих зол зумовлений відмінністю умов спалювання вугілля та систем уловлювання пилу, що, своєю чергою, визначає хімічний склад (табл. 1), ступінь дисперсності, пористість та теплофізичні характеристики зол.

У якості полімерної матриці застосовували дві водні дисперсії, що різняться хімічною природою та реологічними властивостями: Latex 2012, що є водною дисперсією стирол-бутадієнового сополімеру, з вмістом сухого залишку 51,0 мас.%, середнім діаметром частинок близько 140 нм та кінематичною в'язкістю на рівні 200 мПа·с, що забезпечує добру плівкоутворювальну здатність і еластичність композиту та Policril 590 – акриловий полімер у водній фазі з вмістом сухого залишку 53,5–55,0 мас.%, середнім розміром частинок приблизно 200 нм і в'язкістю нижче 1000 мПа·с, що дозволяє забезпечити стабільну структуру з кращою адгезією до неорганічних частинок наповнювача.

Зразки для досліджень являли собою таблетки з діаметром 15 мм і висотою 3–4 мм. Технологія їх виготовлення описана в нашій попередній роботі [10].

Коефіцієнт теплопровідності λ визначали за допомогою приладу ІТ-λ-400, що працює на принципі динамічної калориметрії. Вимірювання проводили в температурному діапазоні 148–373 К, що дозволило оцінити поведінку матеріалів в умовах, наближених до реальної експлуатації. Для побудови термограм залежності λ = f(T) було обрано контрольні температури 298 К і 373 К як репрезентативні точки оцінки ефективності.

Питому поверхню золи оцінювали за методом БЕТ з використанням адсорбції азоту. Розмір кристалітів визначали за допомогою дифрактограм з подальшим застосуванням рівняння Шерера [11], що дозволило оцінити їхні нанорозмірні характеристики:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot cos\theta}$$

де D – розмір кристаліту (нм), K = 0,9 – фактор форми, λ = 1,5406 Å – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, β – FWHM (повна ширина на половині максимуму) у радіанах, θ – кут Брегга.

Для аналізу міжфазної взаємодії золи з полімерною матрицею визначали кут змочування за методом краплі на поверхні. На основі отриманих значень розраховували поверхневу енергію частинок золи за методом Оуенса–Вендта. Ці параметри дозволили кількісно оцінити ступінь взаємодії між наповнювачем та дисперсією.

Таблиця 1

Хімічний склад золи виносу ТЕС

Проба золи виносу	Вміст оксидів, мас.%								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	K_2O	в.п.п.
Бурштинська	46.12	18.00	22.17	1.78	4.03	1.46	0.21	2.10	1.49
Курахівська	51.53	15.98	14.23	1.67	8.15	1.53	0.76	3.81	0.01

Всі результати було оброблено методами варіаційного та кореляційного аналізу. Побудовано залежності теплопровідності від температури, густини та пористості. Для виявлення ключових чинників, що впливають на теплопровідність, використовували метод багатофакторного порівняння.

Виклад основного матеріалу. У продовження попередніх досліджень, присвячених аналізу впливу типу золи та полімерної дисперсії на теплопровідність полімерних композитів [12], у цій роботі основну увагу приділено виявленню структурних факторів, що визначають теплову поведінку матеріалів. Розгляд здійснювався у контексті міжфазної взаємодії, пористості, густини та температурної стабільності, що дозволило поглибити розуміння механізмів теплопереносу в мінералонаповнених полімерних системах. Структурні характеристики зол виносу як наповнювачів мають вагомий вплив на теплопровідну здатність полімерних композитів. Одним із важливих параметрів, що впливають на механізми теплопереносу, є середній розмір кристалітів, який відображає масштаби когерентно дифрагуючих областей у кристалічній фазі золи. Цей показник є особливо чутливим для матеріалів із мікро- та наноструктурованою текстурою, де дрібнодисперсність сприяє зміні умов міжфазної взаємодії та інтенсивнішому фононному розсіюванню, що безпосередньо впливає на зниження теплопровідності композитів.

Для оцінки розміру кристалітів золи Бурштинської та Курахівської ТЕС використовували рівняння Шеррера, застосовуючи дані рентгенофазового аналізу. Розрахунки проводили за двома характерними дифракційними рефлексами для кожного зразка золи. З метою підвищення точності порівняння отримано усереднені значення розмірів кристалітів, які наведено у таблиці 2. Ці дані дають змогу коректно зіставити структурні особливості зол різного походження та визначити їхній потенційний вплив на формування теплопровідних шляхів у структурі полімерних композитів.

Аналіз даних таблиці 2 показує, що зола Курахівської ТЕС характеризується більшими середніми розмірами кристалітів (113,0 нм) порівняно із золою Бурштинської ТЕС (100,4 нм). Така різниця в структурних параметрах може свідчити про нижчий ступінь дефектності кристалічної фази золи К, що сприяє ефективнішому переносу тепла. Це підтверджується вищим значенням теплопровідності для золи Курахівської ТЕС – 0,224 Вт/м·К проти 0,207 Вт/м·К для золи Бурштинської. Таким чином, встановлено кореляцію між більшим розміром кристалітів та покращеними теплопровідними властивостями, що є важливим критерієм для підбору типу золи як функціонального наповнювача в теплоізоляційних композитах.

Полімерна матриця, а також концентрація та природа мінерального наповнювача справляють істотний вплив на теплопровідність полімерних композитів. Відомо, що теплопровідність аморфних полімерів, таких як стирол-бутадієновий Latex 2012 і акриловий Policril 590, зростає з підвищенням температури внаслідок інтенсифікації молекулярних коливань і флуктуацій, які передають теплову енергію між сегментами полімерного ланцюга.

Однак внесок полімерної матриці в загальну теплопровідність системи є обмеженим, особливо при високому вмісті мінеральних наповнювачів. Тому ключовим залишається експериментальне вивчення композитів, модифікованих золами теплоелектростанцій, з метою оцінки ефективності теплопереносу в умовах варіативної мікроструктури та міжфазної взаємодії.

Як показано в попередніх дослідженнях [12], композити на основі Policril 590 характеризуються вищими значеннями теплопровідності порівняно з аналогами на основі Latex 2012. Це пояснюється кращим змочуванням частинок золи та сильнішою адгезією в акрилових системах, що сприяє формуванню більш щільної

Таблиця 2

Розрахунок розміру кристалітів на основі даних дифрактограм

Матеріал	2 θ, °	FWHM, β, рад	Розмір кристаліту, D, нм	Середній розмір кристаліту (нм)	Теплопровідність, Вт/м·К
Зола Б	26,0	0,8	111,3	100,4	0,207
	30,0	1,0	89,5		
Зола К	25,0	0,7	127,0	113,0	0,224
	28,5	0,9	98,6		

контактної сітки між наповнювачами й, відповідно, ефективніших теплопровідних каналів.

Крім типу матриці, ключовими факторами, що визначають теплову поведінку композитів, виступають мінералогічний склад золи, середній розмір кристалітів та об'ємна частка наповнювача. За умов високого наповнення особливо важливо враховувати не лише фізико-хімічні властивості фаз, але й структурні особливості – пористість, густину, а також просторову орієнтацію частинок.

Для аналітичного узагальнення експериментальних результатів було використано декілька підходів до моделювання теплопровідності композитів. Зокрема, перколяційна модель дозволила врахувати утворення зв'язаних теплопровідних шляхів при високих об'ємних частках наповнювача за рахунок контакту й агрегації частинок. Такий підхід відображає ситуацію, коли матеріал переходить у режим домінування теплопереносу через наповнювач.

Серед підходів до моделювання теплопровідності двофазних композитів широкого застосування набула модель Хашина–Штрикмана [13], яка дозволяє оцінити верхню та нижню межі ефективної теплопровідності залежно від теплопровідності кожної фази та об'ємної частки наповнювача. У цьому дослідженні використано нижню межу моделі, яка є релевантною для систем з ізольованими включеннями наповнювача, диспергованими в неперервній полімерній матриці.

Рівняння нижньої межі моделі Хашина–Штрикмана має вигляд:

$$\lambda_{\mathrm{HS,lower}} = \lambda_m + \frac{\varphi}{\left(\frac{1}{\lambda_f - \lambda_m} + \frac{1-\varphi}{3\lambda_m}\right)}$$

де $\lambda_{HS,lower}$ – нижня межа теплопровідності композиту, λ_m – теплопровідність матриці, λ_f – теплопровідність наповнювача, ϕ – об'ємна частка наповнювача.

Ця модель дозволяє визначити теоретично мінімальне значення теплопровідності, яке може бути досягнуто за умов відсутності ефективної взаємодії між частинками наповнювача та матрицею. Порівняння експериментальних результатів із розрахунковими значеннями за цією моделлю дозволяє оцінити ступінь впорядкування наповнювача в структурі, ефективність контактів між фазами, а також виявити можливу наявність перколяційних зв'язків або кластеризації частинок.

Розраховані значення нижньої межі теплопровідності композитів на основі зол Бурштинської та Курахівської ТЕС, а також відповідні експериментальні значення, наведено в таблиці 3.

Результати, наведені в таблиці 3, демонструють узгодженість між експериментально визначеними значеннями теплопровідності композитів при 298 К і теоретичними оцінками, отриманими за допомогою моделей перколяції та Хашина–Штрикмана. Як видно, експериментальні значення λ значно перевищують теоретичні, особливо за перколяційною моделлю, яка суттєво недооцінює ефективність теплопереносу в більшості систем. Це вказує на формування в структурі композиту контактних теплопровідних шляхів та ефективну міжфазну взаємодію,

Таблиця 3

Вихідні дані та результати моделювання

Наповнювач	Матриця ПКМ	Об'ємна частка наповнювача	Теплопровідність при 298 К, Вт/м·К		
			Експериментальна	Перколяції	Хашина-Штрікмана (нижня межа)
Зола Б	Latex 2012	0,509	0,520	0,082	0,158
		0,851	1,042	0,153	0,191
	Policril 590	0,515	0,545	0,086	0,169
		0,854	0,759	0,154	0,195
Зола К	Latex 2012	0,448	0,874	0,098	0,195
		0,797	0,508	0,149	0,213
	Policril 590	0,454	0,508	0,101	0,202
		0,802	0,567	0,151	0,216

що не враховується у спрощеній геометричній моделі.

Модель Хашина–Штрикмана, яка враховує співвідношення фаз та їх теплопровідність, дає значення ближчі до експериментальних. Проте навіть вона не відображає повною мірою реальний приріст теплопровідності, зокрема для композитів із високим об'ємним наповненням (>0,8). Це свідчить про ймовірну наявність перехідної мікроструктури між диспергованим і кластеризованим станом наповнювача, що сприяє ефективнішому переносу тепла.

Порівняльний аналіз показує, що композити на основі золи Курахівської ТЕС мають вищу теплопровідність у всіх випадках, що корелює з їх вищою густиною та нижчою пористістю. Крім того Policril 590 як матриця забезпечує більший приріст λ, ніж Latex 2012, особливо при високих концентраціях наповнювача, що пов'язано з кращим змочуванням і адгезією до золи.

Найбільше відхилення між експериментальним та теоретичним значенням спостерігається у зразках з $\varphi > 0,8$, де виникають умови для перколяції, але традиційна модель її ще не описує адекватно.

Таким чином, таблиця 3 демонструє, що жодна з обраних моделей повністю не описує теплопровідну поведінку композитів із висококонцентрованими зольними наповнювачами, але модель Хашина–Штрикмана надає надійнішу базову оцінку нижньої межі. Експериментальні перевищення цієї межі підтверджують наявність ефективних структурних шляхів теплопереносу, що є ключовим для створення матеріалів із заданими теплоізоляційними властивостями.

Висновки. У ході дослідження було встановлено, що теплофізичні властивості полімерних композитів із використанням золи виносу теплоелектростанцій суттєво залежать від типу золи, її концентрації, природи полімерної матриці, а також структурних параметрів матеріалу – пористості та густини.

Зола Курахівської ТЕС, порівняно з золою Бурштинської ТЕС, забезпечує вищу теплопровідність композитів, що зумовлено її меншою питомою поверхнею, більшою густиною та більшим розміром кристалітів, які сприяють формуванню теплопровідних шляхів.

Застосування акрилової матриці Policril 590 виявилось ефективнішим у контексті теплопровідності, ніж Latex 2012, що пов'язано з кращою змочуваністю поверхні золи та зменшенням міжфазного теплового опору.

Порівняння експериментальних даних із розрахунками за моделями показало, що:

- перколяційна модель недооцінює теплопровідність у системах із високим вмістом наповнювача;
- модель Хашина–Штрикмана забезпечує реалістичніші оцінки, особливо для систем із середнім рівнем наповнення, і може бути використана як базовий підхід для проектування теплоізоляційних матеріалів.

Було доведено, що при $\varphi > 0,8$ виникають умови для утворення перколяційної структури, яка не враховується класичними аналітичними моделями, що створює передумови для подальшого розвитку гібридних моделей прогнозування.

Отримані результати є основою для створення нових теплоізоляційних полімерних матеріалів, адаптованих до вимог сучасного будівництва й енергоефективності, а також підкреслюють доцільність використання зол виносу як вторинної сировини у сфері екологічно орієнтованих матеріалів.

Список літератури:

1. The Effect of Fly Ash Additive on the Thermal Conductivity of Polystyrene Concrete / R. B. Tlegenov et al. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 9. P. 2850. URL: https://doi.org/10.3390/buildings14092850.

2. Caban R., Gnatowski A. Analysis of the Impact of Waste Fly Ash on Changes in the Structure and Thermal Properties of the Produced Recycled Materials Based on Polyethylene. *Materials.* 2024. Vol. 17, № 14. P. 3453. URL: https://doi.org/10.3390/ma17143453.

3. Hybrid Geopolymer Composites Based on Fly Ash Reinforced with Glass and Flax Fibers / H. Šimonová et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 21. P. 9787. URL: https://doi.org/10.3390/app14219787.

4. Mechanical and thermal properties of bottom ash-based porous geopolymer as thermal insulation material for construction / P. S. Soe et al. *Journal of Material Cycles and Waste Management.* 2023. Vol. 25. P. 2964–2975. URL: https://doi.org/10.1007/s10163-023-01732-6.

5. Patsidis A. C., Souliotis M. End-Of-Use Fly Ash as an Effective Reinforcing Filler in Green Polymer Composites. *Polymers.* 2023. Vol. 15, № 16. P. 3418. URL: https://doi.org/10.3390/polym15163418.

6. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties / C. Leiva et al. *Waste Management*. 2015. Vol. 46. P. 298–303. URL: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.027.

7. Cengizler H., Koç M., Şan O. Production of ceramic glass foam of low thermal conductivity by a simple method entirely from fly ash. *Ceramics International.* 2021. Vol. 47, № 20. P. 28460–28470. URL: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.265.

8. Alghamdi M. N. Performance for Fly Ash Reinforced HDPE Composites over the Ageing of Material Components. *Polymers.* 2022. Vol. 14, № 14. P. 2913. URL: https://doi.org/10.3390/polym14142913.

9. Melnyk L. Influence of mineral filler on the thermal conductivity of polymer composites. *Technology audit and production reserves*. 2024. Vol. 6, № 3(80). P. 6–11. URL: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.317659.

10. Melnyk L. I., Cherniak L. P., Yevpak V. V. COMPOSITES BASED ON FLY ASH WITH DIFFERENT POLYMER MATRIXES. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2, № 1. P. 106–112. URL: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18.

11. Blake A. J., Clegg W. *Crystal structure analysis. Principles and practice. 2nd ed.* Oxford: Oxford University Press, 2009. P. 251–263.

12. Thermal Insulation Properties of Red Mud as a Functional Filler for Polymer Composites / L. Melnyk et al. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2025. Vol. 17, № 1. P. 01027–1–01027–6. URL: https://doi.org/10.21272/jnep.17(1).01027.

13. Weidenfeller B., Höfer M., Schilling F. R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2004. Vol. 35, № 4. P. 423–429. URL: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.11.005.

Melnyk L.I., Berehovyj T.O. STRUCTURAL FACTORS INFLUENCING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF COMPOSITES FILLED WITH FLY ASH FROM THERMAL POWER PLANTS

The article presents the results of experimental and theoretical research on the thermophysical properties of polymer composites modified with fly ash from thermal power plants (*TPPs*)*, in particular from Burshtyn and Kurakhove. The study aimed to determine the influence of ash type, concentration, polymer matrix, density, porosity, and temperature on the effective thermal conductivity of the composites. The polymer matrix was represented by water-based dispersions of the acrylic type* (*Policril 590*) *and styrene–butadiene type* (*Latex 2012*)*. The composites were investigated at ash contents of 65 and 90 wt.% within the temperature range of 150–375 K.*

It was found that composites filled with Kurakhove TPP ash exhibit higher thermal conductivity compared to those with Burshtyn TPP ash. This is attributed to the higher density, larger crystallite size, and lower specific surface area of the Kurakhove ash, which contribute to the formation of a more efficient heat-conducting structure. An increase in the composite density leads to improved thermal conductivity, while increased porosity causes a decrease. Composites based on Policril 590 showed better thermal conductivity due to improved interfacial interaction and better wetting of ash particles by the acrylic matrix.

To evaluate the results, a percolation model and the Hashin–Shtrikman model (*lower bound*) *were applied. The experimental values significantly exceeded the calculated ones, indicating the formation of structural heat-conducting channels due to dense particle packing and their aggregation. The Hashin–Shtrikman model provided the most justified lower bound prediction of thermal conductivity for medium-filled systems and can serve as a tool for the preliminary design of insulation material formulations.*

The analysis confirms the potential of fly ash from TPPs as an effective mineral filler for the development of polymer composite materials with controlled thermophysical properties. The results can serve as a basis for further optimization of formulations through chemical or physicomechanical modification of the ash, regulation of porosity, selection of the dispersion medium, and use of hybrid fillers for the creation of energy-efficient, environmentally oriented next-generation materials.

Key words: *composite, filler, fly ash, thermal conductivity, Hashin–Shtrikman model.*

УДК 661:606
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/33

Мітіна Н.Б.
Український державний університет науки і технологій

Мініна Ю.О.
Український державний університет науки і технологій

БІОДЕСТРУКЦІЯ ПОЛІМЕР-ПОЛІМЕРНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ПОЛІСАХАРИДІВ БАКТЕРІЯМИ PSEUDOMONAS

Сучасні полімерні матеріали широко застосовуються в різних галузях промисловості, однак їхня низька здатність до природного розкладу спричиняє серйозні екологічні проблеми. Біологічне розкладання розглядається як перспективний спосіб запобігання забрудненню навколишнього середовища полімерними відходами. Розщеплення полімерних матеріалів зумовлюється ферментативною активністю мікроорганізмів, яка призводить до руйнування полімерного ланцюга на олігомери й мономери, що полегшує подальшу біодеструкцію. Теоретично обґрунтовано авторами вибір роду Pseudomonas як одного з найперспективніших для біодеструкції полімерів. У статті розглянуто біодеструкцію зразків полімер-полімерних сумішей: сополімеру етилена з вінілацетатом (EVA) та хлорованого поліетилену (CPE) за участю комплексу біологічних агентів (штамів Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens УКМ B-109, Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca УКМ-91, культури Eisenia foetida). Експериментально встановлено підвищення електропровідності поживного середовища у дослідних зразках, що свідчить про розщеплення зв'язків полімерних структур, вивільнення іонів та утворення розчинних продуктів біодеструкції. Зміна pH середовища від лужного до кислого підтверджує накопичення кислих метаболітів, синтезованих мікроорганізмами в процесі біодеструкції полімерних матриць CPE та EVA. Встановлено, що за наявності Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca УКМ-91 та Eisenia foetida максимальний рівень деструкції EVA досягає 67%, що майже вдвічі перевищує показники контрольного зразка (34,55%). Визначено, що штам Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca УКМ-91 у складі біокомплексу в шість разів прискорює процес біодеструкції. Результати дослідження підтверджують ефективність біологічних комплексів у біодеструкції полімерних матеріалів і демонструють їх перспективність для створення екологічно безпечних технологій утилізації полімерних відходів.

Ключові слова: *біодеструкція, полімер-полімерні суміші на основі полісахаридів, біологічні комплекси, бактерії Pseudomonas, Eisenia foetida, вермікультивування, екологічна безпека.*

Постановка проблеми. В даний час полімерні матеріали широко використовуються в усіх аспектах людського життя завдяки низькій вартості виробництва, довговічності та високій міцності. Однак значна частина полімерних виробів не підлягає належній утилізації після їх використання. Так, у природному середовищі накопичення великої кількості полімерних відходів серйозно впливає на тварин, рослини та мікроорганізми. Управління та переробка відходів за допомогою традиційних методів утилізації полімерних відходів (захоронення, спалювання, термічна та хімічна обробка) з часом певною мірою вдосконалено. Однак такі методи можуть призвести до вторинного забруднення навколишнього середовища, зокрема спалювання полімерних відходів (без спеціальних фільтрів та інсенерації) небезпечне для людей і довкілля (вуглекислий газ, вуглецевий пил, полівінілхлорид, хлороводень, діоксини, фуран, ізоціонати, альдегіди та ін.); при захороненні токсичні сполуки, що виділяються з відходів у ґрунти, ґрунтові води можуть споживатися організмом людини через харчовий ланцюг, загрожуючи здоров'ю людини (фталати, антипірни, моно та олігомери полімерів, ендокринні дизруптори, важкі метали та ін.). Тому, враховуючи описані недоліки існуючих методів переробки відходів полімерних матеріалів, все більшу перевагу набувають саме біологічні методи деградації. В останні роки дослідники виділили мікроорганізми зі звалищ, морської води, ґрунту, які мають значний потенціал до деградації полімерів, зокрема ідентифіковані штами-кандидати *Pseudomonas sp., Anabaena spiroides, Bacillus sp., Aspergillus flavus* [1]. Вченими досліджено, що

безхребетні організми також можуть руйнувати полімерні відходи, а саме *Eisenia foetida, Tenebrio molito, Galleria mellonella, Achroia grisella ma Lumbriculus variegatus*. Ферменти, що виробляються мікроорганізмами при розкладанні полімерів є дуже ефективними, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу. Отже, деградація біологічними об'єктами має переваги: низька вартість, запобігання виділенню токсичних парів та шкідливих сполук у навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження демонструють значний прогрес у вивченні здатності мікроорганізмів (безхребетні організми, бактерії, гриби та мікроводорості) розкладати різні види полімерів [2].

У статті [3] авторами досліджується біодеструкція лінійного поліетилену низької щільності змішаною культурою бактерій *Pseudomonas aeruginosa* та *Brevibacterium sp.*, використовуючи його як джерело вуглецю, які здатні рости в живильному середовищі, що містить поліетилен при значеннях pH 5, 7, 9 і температурі 25, 30, 35 (^{0}C).

Результати дослідження представлені авторами [4] демонструють, як сильно впливають умови навколишнього середовища на біодеструкцію поліетилену бактерією *Pseudomonas P. Aeruginosa*. Вплив кислого pH навколишнього середовища уповільнює біодеградацію поліетиленового пластику бактерією *Pseudomonas P. Aeruginosa*, врівноважується низькими температурами навколишнього середовища. Однак при температурах, зазвичай оптимальних для швидкості його росту, розмноження сповільнюється в результаті хімічного складу середовища, який став метаболічно менш сприятливим.

П'ять колекційних штамів бактерій, а саме *Pseudomonas chlororaphis, Pseudomonas citronellolis, Bacillus subtilis, Bacillus flexus ma Chelatococcus daeguensi* були протестовані [5] на здатність розкладати поліетиленові, поліпропіленові, полістирольні та полівінілхлоридні (ПВХ) плівки в аеробних умовах. Після 90-денної інкубації, біодеструкція відбувалася лише у випадку ПВХ-плівки в присутності *P. citronellolis ma B. flexus*. Обидва штами діють переважно проти добавок до ПВХ плівок, демонструючи низьку швидкість біодеградації полімеру.

Дослідження науковців [6] підкреслило, що *B. Subtilis* і *B. Licheniformis це* найпоширеніші бактерії в ґрунті, які можуть бути кандидатами для біодеструкції олімерного забруднення. Багато видів бактерій, таких, як *Pseudomonas fluorescens і P. aeruginosa* демонструють високу здатність розкладати поліетилени у водному середовищі з pH 7 при 30–37 ^{0}C. Вивчено авторами, що кисле середовище негативно впливає на діяльність мікроорганізмів, порівняно з лужним станом [7]. Консорціум бактерій (*Pseudomonas putida, Pseudomonas fluorescens, Vibrio alginolyticus, Pseudomonas aeruginosa, Pseudomonas stutzeri, види Flavobacterium і Anabena*) також розщеплюють полімери у злегка лужних умовах з pH 7,5 при 26 °C [8].

Аналіз літературних джерел показав, що доцільно обрати для досліджень бактерії виду *Pseudomonas,* які широко присутні в природному ґрунті, як потенційні штами для розкладання полімерів. *Pseudomonas* це рід аеробних, неспороутворюючих, рухливих грам негативних бактерій, який добре відомий своєю метаболічною універсальністю, що дозволяє йому заселяти різноманітних середовищах та утилізувати надзвичайно широкий спектр полімерів. Біодеструкцію можна вважати сучасним методом очищення довкілля від полімерного забруднення.

У попередніх дослідженнях авторами було визначено ступінь деградації полімерних композицій EVA-крохмаль та CPE-крохмаль у середовищі біогумусу, що містить активну вермібіоту [9]. Проте вплив окремих біологічних агентів, зокрема бактерій, на ефективність деструкції залишався недостатньо вивченим. У межах цієї роботи дослід було модифіковано шляхом введення до субстрату бактеріального штаму *Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens УКМ B-109, Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca УКМ-91,* що дозволить проаналізувати їх роль у процесах біодеструкції полімерів у поєднанні з активністю Eisenia foetida. Такий підхід відкриває перспективи цілеспрямованої біодеструкції синтетичних полімерів за участю комплексних біологічних систем.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження процесу біодеструкції полімер-полімерних сумішей на основі полісахаридів бактеріями *Pseudomonas* шляхом вермікультивування.

Виклад основного матеріалу. Дослідження зосереджені на використанні штамів *Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca* УКМ-9*, Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens* УКМ B-109 *для* біодеструкції полімер-полімерних сумішей: сополімеру етилена з вінілацетатом (EVA) та хлорованого поліетилену (CPE) (колекції мікроорганізмів Інституту мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного

НАН України (рис. 1). Штами вирощували на м'ясо-пептонному бульйоні (pH 8,2–8,4), стерилізували в автоклаві при температурі 121 °С продовж 30 хвилин. Зважування проводили торсіонними вагами типу WT-500, температуру, електропровідність, рівень pH вимірювали приладом Hanna HI 991300. Оптичним приладом Digital Microscope MM-2288-5X-BN мікроскопіювали зразки. Експеримент тривав 60 діб.

Рис. 1. Культури бактерій роду *Pseudomonas*

Для виділення мікроорганізмів з ґрунту та подальшого аналізу колоній на різних середовищах провели дослідження за загальноприйнятими методиками із використанням серійних розведень ґрунтової суспензії [10, 11]. Для проведення досліду підготовлено чотирнадцять зразків однакової ваги, їх склад наведено у таблиці 1.

Кожні 15 діб вимірювали pH у досліджуваних зразках. Динаміка pH середовища під час біодеструкції зразків полімерних сумішей з додаванням біологічних комплексів наведена на рисунку 2.

При pH середовища 6,5–7,5 мікробіологічна активність сприяла біодеструкції всіх зразків полімерів. У лужному середовищі (pH 7,6) за наявності штаму *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109 pH знижувався до 6,8 у зразках (1, 9, 11), що свідчить про розщеплення вінілацетатних зв'язків з утворенням оцтової кислоти. Натомість у зразках (6, 7, 8) зі штамом *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ В-91 pH майже не змінювався. У контрольних зразках (13, 14) pH середовища залишався лужним, що свідчить про повільний перебіг біодеструкції полімерів.

На рисунку 3 представлено динаміку змін електропровідності середовища в процесі біодеструкції зразків полімерних матеріалів. Електропровідність у зразках змінювалася з часом, демонструючи загальну тенденцію до зростання на початкових етапах. Через 15 діб показники електропровідності більшості зразків знаходилися в діапазоні від 1500 до 2400 мкСм/см. На 30-ту добу у зразка (1) спостерігалася стабілізація, тоді як в інших зразках зафіксовано зниження електропровідності.

Таблиця 1

Склад експериментальних зразків для біодеструкції полімерів

№ зразка	Полімер	Об'єм суспензії, мл	Біологічний комплекс	
			Штам бактерій	Культура *Eisenia foetida*
1.	EVA	10	Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens УКМ В-109	+
2.		30		+
3.	CPE	10	Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens УКМ В-109	+
4.		30		+
5.	EVA	10	Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca УКМ-91	+
6.		30		+
7.	CPE	10	Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca УКМ-91	+
8.		30		+
9.	EVA	10	Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens УКМ В-109	-
10.	CPE	10	Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca УКМ-91	-
11.	EVA	30	Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens УКМ В-109	-
12.	CPE	30	Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca УКМ-91	-
13.	EVA	-		Контроль
14.	CPE	-		

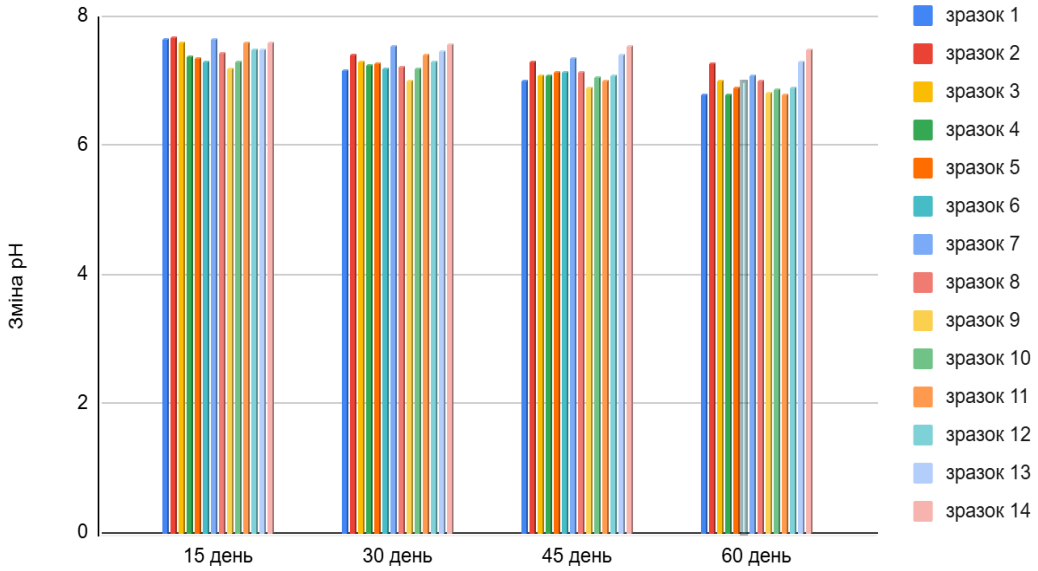


Рис. 2. Динаміка pH середовища під час біодеструкції зразків полімерних сумішей

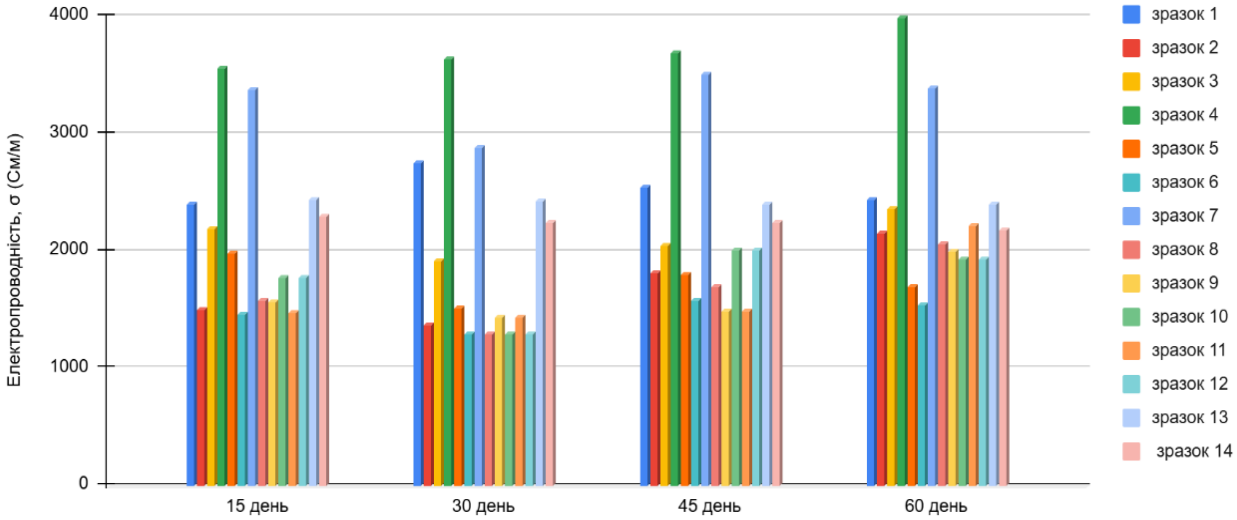


Рис. 3. Динаміка електропровідності у процесі біодеструкції

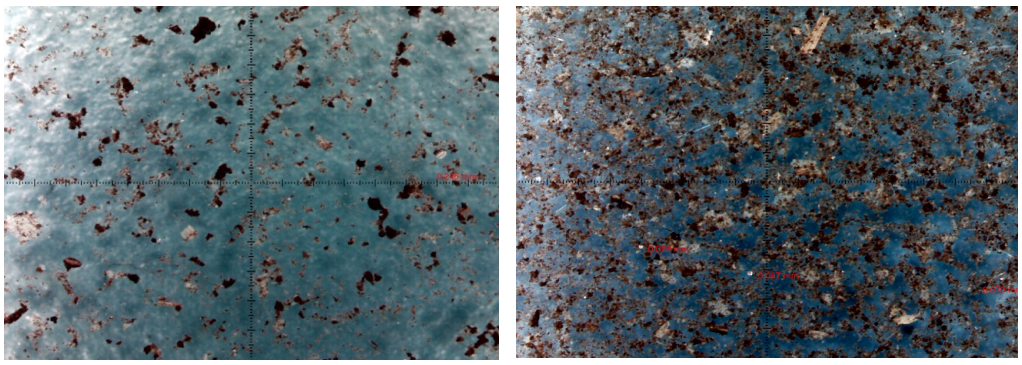
На 45-й день значення варіювалися в межах 1800–2547 мкСм/см для більшості зразків, за винятком зразка (4). На 60-й день відзначалося загальне зниження електропровідності у всіх зразках, крім зразка (4 СРЕ), електропровідність якого досягла максимального значення 3999 мкСм/см.

Висока електропровідність зразка (4) зумовлена особливостями складу хлорованого полімеру. Загалом спостерігається поступове зниження електропровідності, що може свідчити про зміну хімічного складу під час біодеструкції або про взаємодію компонентів полімерів із середовищем. У контрольних зразках (13, 14) електропровідність змінювалася незначно: з 2437 до 2180 мкСм/см.

Кожні 15 діб здійснювали оптичні дослідження зразків полімерних сумішей, що зазнавали впливу біологічного комплексу у процесі вермікультивування (табл. 1). Результати дослідження поверхні зразків (5, 6) виготовлених із сополімеру етилену з вінілацетатом, до та після біодеструкції в присутності компонентів біологічного комплексу *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109 і *Eisenia foetida* наведено на рисунку 4.

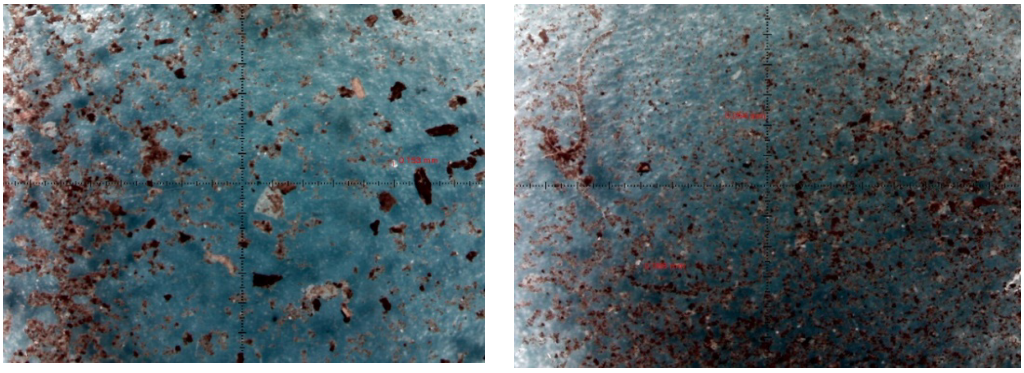
Дослідження поверхні зразків (7, 8 СРЕ) у вермікомпості в присутності об'єктів біологічного комплексу *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ-91 та *Eisenia foetida* наведено на рисунку 5.

Рівень біодеструкції досліджуваних зразків наочно представлено на діаграмі (рис. 6), побудованій за результатами оптичного аналізу.



a) b)

Рис. 4. Зміни поверхні зразків EVA в присутності об'єктів біологічного комплексу a) до експерименту; b) після 60 діб біодеструкції



a) b)

Рис. 5. Зміни поверхні зразків CPE в присутності біологічного комплексу: a) до експерименту; b) після 60 діб біодеструкції

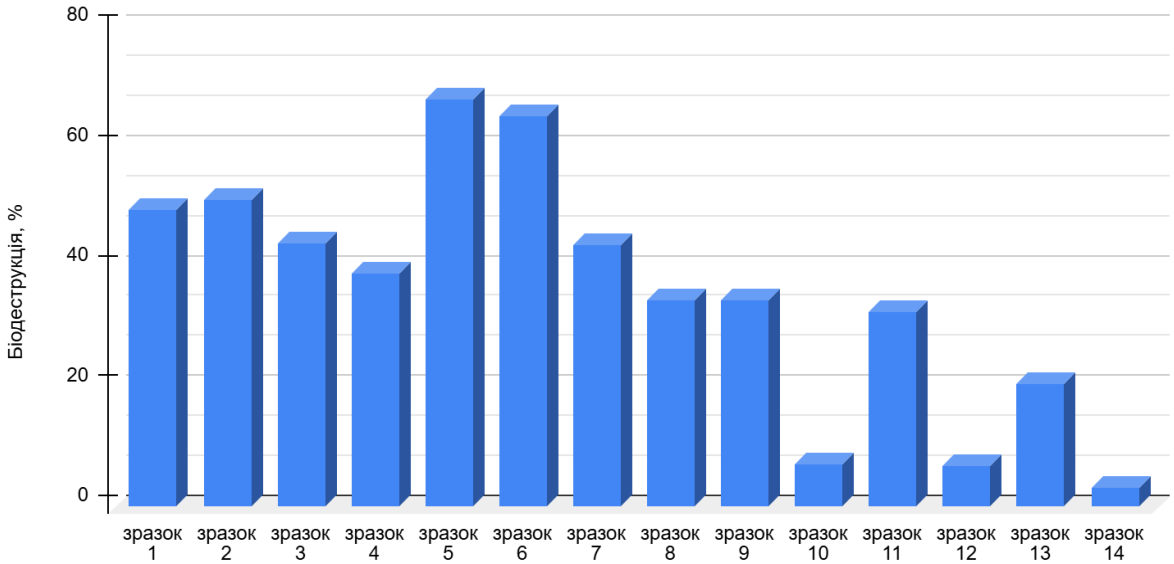


Рис. 6. Біодеструкція полімерних зразків під дією штамів Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca УКМ B-91 та Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens УКМ B-109

Для зразка CPE встановлено, що у складі біокомплексу *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ B-109 та *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ B-91 рівень біодеструкції становив 43%. Дослідження розкладання полімер-полімерної суміші EVA

(зразок 5) показало, що за наявності *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ В-91 ступінь біодеструкції досягав 67%. Таким чином, біодеструкція EVA у присутності цього штаму була ефективнішою на 32,45% порівняно з СРЕ. Зразок СРЕ (7, 8) зазнав біодеструкції на 43,70% за участі біокомплексу з *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ В-91, тоді як у контрольному середовищі ступінь розкладання становив лише 7,14%. Вплив мікробіоти біокомплексу сприяв підвищенню ефективності деструкції зразків СРЕ на 36,56%. Отже, у зразках, що містили біокомплекс *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ В-91 та Eisenia foetida, швидкість біодеструкції полімерів СРЕ і EVA (рис. 6) перевищувала контрольне середовище у шість разів

Висновки. У результаті дослідження біодеструкції полімер-полімерних сумішей (EVA та СРЕ) встановлено, що штами *Pseudomonas chlororaphis subsp. aureofaciens* УКМ В-109 та *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ В-91 здатні ефективно розкладати дані матеріали за рахунок ферментативної активності. Зниження pH середовища до кислих значень свідчить про утворення метаболітів, зокрема органічних кислот, у процесі біодеструкції, що підтверджує біологічну активність штамів щодо розщеплення полімерних зв'язків. Підвищення електропровідності середовища у зразках з бактеріальними штамами свідчить про вивільнення іонів та розчинних продуктів біодеградації, що підтверджує активний процес розщеплення полімерних матеріалів. Найвищий рівень біодеструкції (67%) спостерігався у зразках EVA за участі біокомплексу *Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca* УКМ В-91 та *Eisenia foetida,* що у шість разів перевищує ефективність у контрольному середовищі. Отримані результати вказують на перспективність використання біокомплексів у розробці екологічно безпечних технологій утилізації полімерних відходів.

Список літератури:

1. Переробка полімерних відходів вермикультивуванням / Мітіна Н.Б., Мініна Ю.О. / Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 36 (75) № 1, 2025. 205 с.

2. Goldman E. Practical Handbook of Microbiology / E. Goldman, L. Green. – Third Edition. Boca Raton: CRC Press, 2015. 1055 p.

3. Експериментальна ґрунтова мікробіологія: монографія / В.В. Волкогон, О.В. Надкернична, Л.М. Токмакова та ін.; за ред. В.В. Волкогона. К.: Аграрна наука, 2010. 464 с.

4. Chia W.Y., Ying Tang D.Y., Khoo K.S., Kay Lup A.N., Chew K.W. Nature's Fight against Plastic Pollution: Algae for Plastic Biodegradation and Bioplastics Production. Environ. Sci. Ecotechnology. 2020;4:100065. DOI: 10.1016/j.ese.2020.100065.

5. Dwicania, E., Rinanti, A., & Fachrul, M. F. (2019). Biodegradation of LLDPE plastic by mixed bacteria culture of Pseudomonas aeruginosa and Brevibacterium sp. Journal of Physics: Conference Series, 1402, 022105. DOI:10.1088/1742 6596/1402/2/022105

6. Edith B. Mouafo Tamnou, Antoine Tamsa Arfao, Mireille E. Nougang, Claire S. Metsopkeng, Olive V. Noah Ewoti, Luciane M. Moungang, Paul A. Nana, Linda-Rose Atem Takang-Etta, Fanny Perrière, Télesphore Sime-Ngando, Moïse Nola, Biodegradation of polyethylene by the bacterium Pseudomonas aeruginosa in acidic aquatic microcosm and effect of the environmental temperature, Environmental Challenges, Volume 3, 2021, 100056, ISSN 2667-0100, https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100056.

7. Giacomucci, L., Raddadi, N., Soccio, M., Lotti, N., & Fava, F. (2019). Polyvinyl chloride biodegradation by Pseudomonas citronellolis and Bacillus flexus. New Biotechnology. DOI:10.1016/j.nbt.2019.04.005

8. Yao, Z., Seong, H.J. & Jang, YS. Degradation of low density polyethylene by Bacillus species. Appl Biol Chem 65, 84 (2022). https://doi.org/10.1186/s13765-022-00753-3

9. Дослідження умов біодеградації полімер-полімерних сумішей в процесі вермікультивування / Мініна Ю.О., Мітіна Н.Б., Третьяков А.О./ Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 35 (74) № 1 2024. 113 с.

10. International Organization for Standardization. (2009). ISO 10381-6:2009 – Soil quality – Sampling – Part 6: Guidance on the collection, handling and storage of soil for the assessment of aerobic microbial processes in soil. ISO.

11. ISO 4833-1:2013. Microbiology of the food chain – Horizontal method for the enumeration of microorganisms – Part 1: Colony count at 30 degrees C by the pour plate technique. International Organization for Standardization, 2013.

Mitina N.B., Minina Yu.O. BIODEGRADATION OF POLYMER-POLYMER BLENDS BASED ON POLYSACCHARIDES BY PSEUDOMONAS BACTERIA

Modern polymeric materials are widely used in various industries, but their low biodegradability causes serious environmental problems. Biodegradation is seen as a promising way to prevent environmental pollution from polymer waste. The breakdown of polymeric materials is caused by the enzymatic activity of microorganisms, which leads to the destruction of the polymer chain into oligomers and monomers, which facilitates further biodegradation. The authors theoretically substantiate the choice of the genus Pseudomonas as one of the most promising for polymer biodegradation. The article deals with the biodegradation of samples of polymer-polymer mixtures: ethylene vinyl acetate copolymer (*EVA*) *and chlorinated polyethylene* (*CPE*) *with the participation of a complex of biological agents* (*Pseudomonas chlororaphis subsp aureofaciens strain UCM B-109, Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca strain UCM-91, Eisenia foetida culture*). *An increase in the electrical conductivity of the culture medium in the experimental samples was experimentally established, indicating the breakdown of polymer bonds, the release of ions, and the formation of soluble biodegradation products. The change in the pH of the medium from alkaline to acidic confirms the accumulation of acidic metabolites synthesized by microorganisms in the process of biodegradation of CPE and EVA polymer matrices. It was found that in the presence of Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca UCM-91 and Eisenia foetida, the maximum level of EVA destruction reaches 67%, which is almost twice as high as that of the control sample* (*34.55%*). *It was determined that the strain of Pseudomonas chlororaphis subsp aurantiaca UCM-91 as part of the biocomplex accelerates the biodegradation process six times. The results of the study confirm the effectiveness of biological complexes in the biodegradation of polymeric materials and demonstrate their prospects for the creation of environmentally friendly technologies for the utilization of polymeric waste.*

Key words: *biodegradation, polymer-polymer mixtures based on polysaccharides, biological complexes, Pseudomonas bacteria, Eisenia foetida, vermiculture, environmental safety.*

UDC 661.9:544.558
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/34

Petrov S.V.
The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

Bondarenko S.G.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Sanginova O.V.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Kolesnyk V.V.
State University of Infrastructure and Technologies

Orlyk V.M.
The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

Ganczarski M.
Hydrogenium PSA: Lublin, Poland

Rój E.
Hydrogenium PSA: Lublin, Poland

WATER VAPOR PLASMA GASIFICATION OF PLASTIC

Growing plastic consumption leads to an ever-increasing flow of waste with a high plastic content. Plastic waste is almost entirely made from primary raw materials based on fossil fuels; therefore, plastic is recycled or disposed of. At the same time, a special group of medical waste is classified as toxic and hazardous materials, subject to additional disinfection during processing and disposal. Plastic is one of the most widely available energy sources, and gasification allows it to be converted into combustible gases. The article considers the plasma method of gasification of solid plastic waste. To implement the plasma method of processing plastic waste, including hazardous medical waste, a laboratory setup was created to process waste using plasma and study the gasification process. Water vapor, air and mixtures of water vapor with air and oxygen were used as working gases in the gasification of plastic. vapor arc plasma torches of various designs with a power of up to 160 kW were used in the plasma reactor. When selecting the geometric dimensions of the reactor working chamber, the requirement was considered that the residence time of the processing products in the high-temperature zone should be no less than the time sufficient for complete disinfection of infectious agents. This time was determined using the equation of the kinetics of the disinfection process. Calculation of the gasification process parameters was performed using an automated system of thermodynamic calculations. As a result of the calculations, the energy characteristics and equilibrium composition of the products of plastic waste processing in water vapor plasma were determined. The calculations made it possible to determine the requirements for the effective management of the plastic gasification process. The required operating mode was preliminarily estimated on a smaller-scale laboratory reactor using a 1.5 kW vapor plasma torch. It was shown that the results of thermodynamic calculations match the experiment in a heat-insulated reactor and under kinetic conditions. Optimization of the plasma gasification process will allow the development of industrial technology for processing plastic waste to produce hydrogen-enriched synthesis gas.

Key words: *plastic recycling, vapor plasma gasification of plastic, synthesis gas, plasma technologies, disinfection, thermodynamic calculations, calculation algorithm.*

Formulation of the problem. Effective waste management is an increasingly pressing challenge numerous countries face, primarily due to its profound environmental impact. In the ever-increasing waste stream, the share of plastics is growing, which is becoming a common problem because it is practically non-degradable in the natural environment. The consumption of plastic materials is vast and steadily increasing. Plastics are "one of the greatest innovations of the millennium" and have proven their reputation. The durability and strength of plastics create significant environmental challenges for waste disposal. With a degradation rate of between 100 and 1,000 years, the earliest plastics may still exist in the environment, leading to severe ecological concerns. Therefore, the first plastic invented may still exist in nature. The annual global plastic production is more than 359 million tons. And it is expected that plastic production will continue to grow exponentially in the future [1]. According to the forecast of Stubbins et al. [2], by 2035, the volume of accumulated plastic waste will equal the number of fish in the oceans. Traditional materials such as glass, wood, metal, and paper are gradually being replaced by plastic due to the shortage of raw materials in the modern era. Plastic materials are almost entirely produced from fossil fuel-based virgin raw materials (about 4 % of fossil fuels are used for this) for various applications. Because of this, plastic that ends up in waste is recycled or disposed of. First, medical waste is classified as toxic and hazardous materials. Currently, 85 % of medical products, such as intravenous bags, disposable syringes, sterile packaging, and joint replacements, are made of plastic due to its lightweight and biocompatibility. Overall, the plastic fraction constitutes a significant proportion of the total waste volume. The dominant plastic types produced globally include polyethylene (29.6 %), polypropylene (18.9 %), polyvinyl chloride (10.4 %), polystyrene (7.1 %), polyethylene terephthalate (6.9 %), polyurethane (7.4 %), along with other types of plastic, which collectively account for approximately 19.7 % of the global plastics produced. Depending on the end use of the plastic product, at some point during its life, the plastic will become waste in various sectors of commercial, industrial, and household waste. Moreover, plastic pollution poses chemical hazards, particularly with substances that contain endocrine-disrupting chemicals. Additionally, hydrophobic chemicals can adsorb environmental pollutants [3]. These chemicals can be directly ingested by organisms or leak into the environment. Potential impacts include reproductive dysfunction, low birth rates, loss of biodiversity, thyroid problems, metabolic disorders, and increased risk of hormone-sensitive cancers. Critically sensitive periods for these effects include the embryonic stages of development, with adverse outcomes observed at extremely low concentrations. Plastics also disrupt human life [1]. Chemical additives in plastics such as bisphenol A (BPA), phthalates, and brominated flame retardants (BFRs) can cause critical damage to health. Plastic pollution reduces human benefits from the oceans by 1–5 %, equivalent to an annual loss of $2,500 billion. However, plastic waste can be separated from various waste streams for subsequent recycling, recovery, and reprocessing. Therefore, areas for developing and improving plastic waste recycling technologies are relevant.

Analysis of recent research and publications. The financial implications associated with waste management technologies demonstrate significant geographic variability: US$0.003–0.23/kg for mechanical recycling, US$0.083 for chemical recycling (pyrolysis), US$0.102 for chemical recycling (gasification), and US$0.04–0.15 for incineration. According to the North American Plastic Recycling Market Report, the United States spent US$2.6 billion on recycling and US$17–24 million on incineration [4]. Until now, plastic has been predominantly recycled mechanically. Mechanical recycling is a low-cost method that does not require significant changes in the chemical structure of the materials. However, mechanical recycling has some limitations. Recycling all types of plastic, especially contaminated or made from multiple materials, is not always possible. In addition, the quality of recycled plastics may not be as high as that of primary plastics. Therefore, mechanically recycled plastics have limited applications. Alternative methods of producing fuels and feedstocks from plastic waste are also being explored [5]. The most common way to dispose of mixed plastic waste is in a landfill. India, in particular, has been a favourite dumping ground for plastic waste, mainly from industrialised countries such as Canada, Denmark, Germany, the UK, the Netherlands, Japan, France, and the US [6]. According to government data, more than 61,000 tonnes of plastic waste entered India in 1999 and 2000. However, landfills are generally less preferred overall than other waste management options. Disposal of plastic waste in landfills is very

unprofitable because plastic is based on oil or natural gas and does not decompose in a landfill.

Since plastics only contain carbon, oxygen, and hydrogen atoms, incineration is still used in some energy recovery plants. Incineration is also preferable to landfilling. However, incineration is not the best option for plastic disposal. Incineration leads to problems with incinerator ash and CO_2 emissions, which cause the greenhouse effect. Incinerators dump landfill waste into the sky and create new pollutants.

When evaluating plastic recycling scenarios, pyrolysis performs better than landfill and incineration, but worse than other recycling options. It should be noted that plastic waste management analyses typically do not consider possible future formation changes: the amount of plastic entering the waste stream and its diversity. Waste streams can be reduced in response to the desire and suitability for recycling. Recycling is the best possible solution to the plastics industry's environmental problems. However, many subsequent problems need to be addressed shortly.

Task statement. The article aims to increase knowledge of the plastic waste recycling sector. This knowledge will enable the development of resource-saving technologies for recycling plastic that ends up in waste and is not used as secondary raw materials. In addition, the work aims to study the processes of water vapor plasma gasification of plastic to obtain synthesis gas enriched with hydrogen.

To achieve the set goals, it is necessary to complete the following tasks:

1. Considering the results of thermodynamic calculations of the processes of water vapor plasma gasification of plastic, develop and study a water vapor plasma reactor for gasification of plastic.

2. Study the efficiency of the reactor using water vapor, air, and a mixture of water vapor with air and oxygen as working gases.

The work's results will reduce emissions and leakage of hazardous substances from landfills into the atmosphere and groundwater, reducing the need for space for waste disposal.

Outline of the main material of the study. Currently, two primary technologies are employed for converting plastic waste into energy: pyrolysis and gasification. Pyrolysis, also known as thermal degradation, involves heating plastic waste at a temperature of about 300–650 °C in the absence of O_2, and the main product can be petroleum fuel. In gasification, plastic waste reacts with a gasifying agent (e.g., steam, oxygen, and air) at a high temperature of about 1000–1300 °C, resulting in synthesis gas. The main difference between these methods is the product obtained. Synthesis gas can be further used to produce many products, such as fuel for fuel cells, power generation, etc. Thus, gasification leads to a significant reduction in the volume of plastic waste. Consequently, this process reduces the consumption of fossil fuels.

Below is an in-depth analysis of the plasma method for recycling solid plastic waste. Since the calorific value of plastics is comparable to that of fuel, fuel production would be a better alternative. In this way, we are trying to solve the problem of plastic waste disposal and the shortage of traditional fuel, thereby contributing to the preservation of a sustainable environment.

Research on the gasification of plastic materials is relatively sparse, indicating a significant gap in academic literature. Although there are several experimental and theoretical studies [7–11] on plastic waste gasification, more detailed development of the process is an important task. A promising alternative is plasma pyrolysis combined with reforming, which allows the synthesis of gas to be obtained with a high hydrogen content and is utterly free of resin. The authors' study was conducted in this vein. Developing value-added waste recycling technologies is highly desirable, as it will increase the economic incentive for plastic recycling. Their gasification can certainly be developed into an effective recycling method for producing synthesis gas enriched with H_2 and CO. Although industrial-scale references are given in the literature, future breakthroughs in the process will require further experiments, and work on improving the design of the equipment, and optimization of the technology. Advances in this area will contribute to the improvement and broader use of gasification reactors. Although plasma technologies have a long history, their application in waste disposal is still limited. However, over the past twenty years, plasma technologies and waste disposal research have increased [12].

Plasma technology has long been used for surface treatment, coating, and disposal of hazardous waste. Still, its application in plastic waste, especially polyethylene terephthalate, has not been fully explored due to the high energy consumption of plasma gasification reactors. The treatment of plastic waste using various chemical recycling methods that convert plastic waste into fuel and other valuable products has attracted many researchers. In the paper [13], reviewing the status of the problem,

competitive technologies, and opportunities for further research in the field of plastic waste gasification, the authors identify plasma gasification as a competitive technology.

To implement the plasma method of processing plastic waste, the authors created a laboratory setup designed to develop, study and demonstrate the process of processing various waste using plasma. The results obtained by the authors can be a guideline in creating such industrial installations.

Fig. 1 shows the laboratory reactor illustration for vapor plasma gasification.

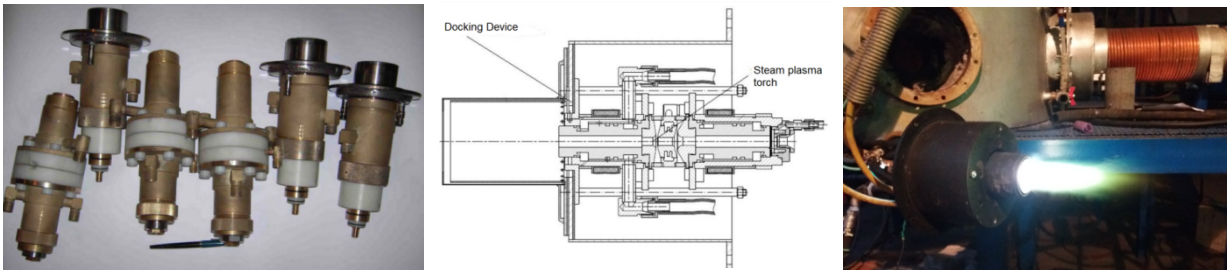
Fig. 2 shows vapor arc plasma torches in various designs with a power of up to 160 kW. The working gases used are water vapor, air, and mixtures of water vapor with air and oxygen.

The reactor (Fig. 1) can process both plastic waste and hazardous medical waste, as well as their mixtures.

To perform calculations on thermodynamic equilibrium in the process of thermal transformation of initial materials under the action of a high-temperature steam-air plasma jet, it is necessary to interpret the actual composition of the processed materials in the form of their typical representatives under the accepted concepts of chemistry. Considering the diversity of materials related to the same group of waste, a typical representative was selected for each of them, the structure of which is displayed as a gross formula. Such a representation is quite rough from the point of view of obtaining the final products of the reaction occurring under "mild" conditions; however, such a representation is justified for the analysis of high-temperature transformation (pyrolysis, conversion). For polyethylene and polypropylene containing only carbon (C) and hydrogen (H) atoms, the same gross formula was used in subsequent calculations – C_5H_{10}. For polyvinyl chloride (PVC), which contains a chlorine atom (Cl), the formula C_2H_3Cl was used. PVC has an advantage over other plastics in that it is easily mixed with additives. This gives the material a wide range of uses. Many environmental disadvantages of PVC compared to other plastics are as follows: leakage of heavy metal stabilizers and the formation of dioxins during combustion. The separate collection of PVC waste by type of product is hardly possible. The overwhelming majority of dry medicinal products contain active components in hundredths of a percent, and the basis is starch-based fillers. Starch, like cellulose, is a polysaccharide; accordingly,

a b c

Fig. 1. General view of the laboratory reactor for water vapor plasma gasification: a – reactor with a tangential plasma torch installation in section; b – 100 kW vapor plasma jet against the background of the reactor and scrubber; c – plasma torch installation with a steam preparation system in the reactor



a b c

Fig. 2. Vapor electric arc plasma torch with a power of up to 160 kW: a – vapor plasma torches with hollow copper electrodes (3 pcs.) and a tungsten hot cathode (3 pcs.) with recuperative heating of vapor before blowing into the arc chamber; b – plasma torch with hollow copper electrodes according to a three-electrode scheme and a docking device; c – plasma jet at the outlet of the docking device

the same gross formula was used for them as for dressings – $C_6H_{10}O_5$. With an average moisture content of 20 %, a specific moisture content was adopted for each group of materials under consideration. Thus, it was assumed that the amount of moisture directly introduced with them was zero when processing only polymeric materials.

In the model consideration of physicochemical, heat and mass transfer, and thermogasdynamic processes occurring at elevated temperatures, problems arise regarding finding the reaction products' composition and determining the thermodynamic and transport properties of high-temperature surroundings. These properties, in turn, also depend on the composition of the working fluids – multi-component mixtures of dissociating gases and individual condensed phases, and are functions of state: temperature, pressure, specific volume, etc. As a rule, considering kinetic, heat, and mass transfer processes at elevated temperatures, which are already at the stage of setting the modeling problem, leads to significant difficulties. Detailed calculation schemes are usually associated with mathematical complexities and the absence of the necessary closing initial data, and in simplified models, with excessive schematization of the process. In this regard, thermodynamic simulation methods have gained tremendous popularity. They assume that the working fluid in the processes under consideration forms a conditionally closed, isolated system in which local phase and chemical equilibrium have been established. In this approximation, the state of the system is determined only by the content of chemical elements in it and the value of two state parameters.

The validity of using the thermodynamic equilibrium approximation is justified by the high level of energy concentration in the volumes under consideration and, consequently, the high rates of transformation processes, which instantly bring the environment to a state of local equilibrium.

To calculate the specific energy costs for high-temperature processing of plastic waste, in addition to knowing the parameters of the equilibrium composition corresponding to the selected temperature of the process, it is necessary to understand the standard enthalpy of formation of the initial materials to be processed. Unfortunately, such data are unavailable in the literature for many of these components. Therefore, for many substances consisting mainly of hydrocarbons, an approach based on the well-known empirical formula of D.I. Mendeleyev for calculating the heat of combustion of substances was chosen as an indirect method for determining the standard enthalpy of formation.

One of the basic requirements for processing hazardous and harmful waste is to ensure its reliable disinfection. The technology being developed involves conducting the waste processing process in the range of 1000–1600 °C. Therefore, when choosing the geometric dimensions of the working chamber of the reactor, it is necessary to ensure that the condition is met, which consists in the fact that the residence time of the processed products in the high-temperature zone should be no less than the time sufficient for the complete disinfection of infectious agents contained in the original products.

Since at the planned high temperatures decomposition reactions of almost all materials proceed with high speed to the end, a gross equation of the following form was chosen to describe the kinetics of the decontamination process:

$$\frac{dx}{d\tau} = k(T) \bullet x,$$

where x is the fraction of non-disinfected agents, $k(T)$ – rate constant depending on temperature T K, sec^{-1}, τ – time, sec.

The solution of which

$$x(\tau) = \exp\left(-k(T) \bullet \tau\right)$$

allows to determine the degree of decomposition at selected temperature and reaction time.

To evaluate the generalized dependence of the reaction rate on temperature calculated for the most resistant materials, it was assumed that at a temperature of 100 °C and a 2 second exposure time, the proportion of virulent agents retaining viability is 0.99999, and at 1100 °C and the same exposure time – 10^{-5}, which practically coincides with the condition of complete disinfection.

The result is for the rate constant in the form of an Arrhenius dependence:

$$K(T) = A \bullet \exp\left(-\frac{E}{R_E \bullet T}\right).$$

We have: *$A = 1049{,}5\ sec^{-1}$; $E = 59421{,}1$ kJ/kmol; $R_E = 8{,}314$ kJ/(kmol·K)*.

The obtained data allow estimating the required residence time of infected medical waste in the reaction zone for different temperatures (see Table 1).

Table 1

Dependence of the required residence time of infected medical waste in the reaction volume on the temperature of the decontamination process

t, °C	T, K	k(T), сек-1	τ, сек
1000	1273	3,82435294	3,010426
1100	1373	5,75646499	2
1200	1473	8,19671816	1,404578
1300	1573	11,1585897	1,031755
1400	1673	14,6407443	0,786362
1500	1773	18,6299391	0,61798
1600	1873	23,1039009	0,498311

Thermodynamic calculation of the process of recycling waste of various compositions using a low-temperature plasma jet as an external heat source and reaction components requires knowledge of its main quantitative indicators. In the case under consideration, the plasma jet can be formed both by using only water vapor and water vapor and air in a particular proportion. Moreover, in the latter case, not only can atmospheric air be used, but air enriched with oxygen can also be used, up to technical oxygen. The calculation is based on the energy balance method using the original components' total enthalpy and the resulting plasma jet of a given temperature.

The enthalpies were calculated using the automated thermodynamic calculation system TERRA. The initial enthalpy of water vapor corresponded to the total enthalpy of saturated water vapor at a temperature of 100 °C, and the enthalpy of air corresponded to the total enthalpy at 20 °C. The calculations were performed for various water/air ratios in the plasma jet, using atmospheric air (η = 0.23, where η is the mass fraction of oxygen) and oxygen-enriched air (η = 0.55).

One of the most thermodynamically stable products of high-temperature plasma waste treatment is carbon monoxide – CO. Its formation can occur due to the oxidation of free carbon by oxygen contained in the plasma jet and oxygen released during the decomposition of a water molecule. The reactions indicated are as follows:

$$H_2O \rightarrow H_2 + 0{,}5O_2 \ (242334\ kJ/kmol),$$
$$C + 0{,}5O_2 \rightarrow CO \ (-124413\ kJ/kmol).$$

The energy ΔQ_1 that must be expended to obtain 1 kg of oxygen by decomposing water is: $\Delta Q_1 = 242334/16 = 15146$ kJ. In this case, 8/9 kg of oxygen is obtained from 1 kg of water.

The amount of energy ΔQ_2 released during carbon oxidation by oxygen is: $\Delta Q_2 = (8/9)\cdot 124413/16 = 6912$ kJ.

Thus, the carbon oxidation by oxygen contained in 1 kg of water (the reaction of carbon conversion by water) is described by the overall reaction in the form:

$$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$$

requires energy expenditure

$\Delta Q_{H2O} = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 = 15146 - 6912 = 8234$ kJ.

Oxidation of carbon directly by oxygen contained in the plasma jet releases energy (per 1 kg of oxygen): $\Delta Q_{O2} = 124413/16 = 7776$ kJ.

Using the results of calculating the parameters of the plasma jet for specific temperatures and at different water/air ratios, it is possible to construct graphs of the dependence of the energy that will be released in the reaction volume during the combined reaction of carbon conversion and oxidation on the temperature of the plasma jet (Fig. 3, 4).

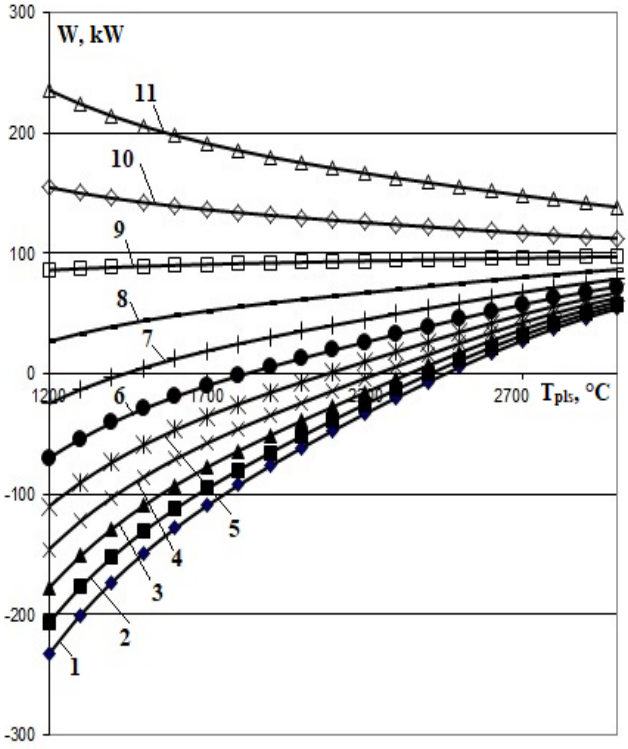


Fig. 3. Energy balance of the process of carbon oxidation by a vapor – air plasma jet at different water vapor/air ratios: 1 – 1/0; 2 – 0,9/0,1; 3 – 0,8/0,2; 4 – 0,7/0,3; 5 – 0,6/0,4; 6 – 0,5/0,5; 7 – 0,4/0,6; 8 – 0,3/0,7; 9 – 0,2/0,8; 10 – 0,1/0,9; 11 – 0/1

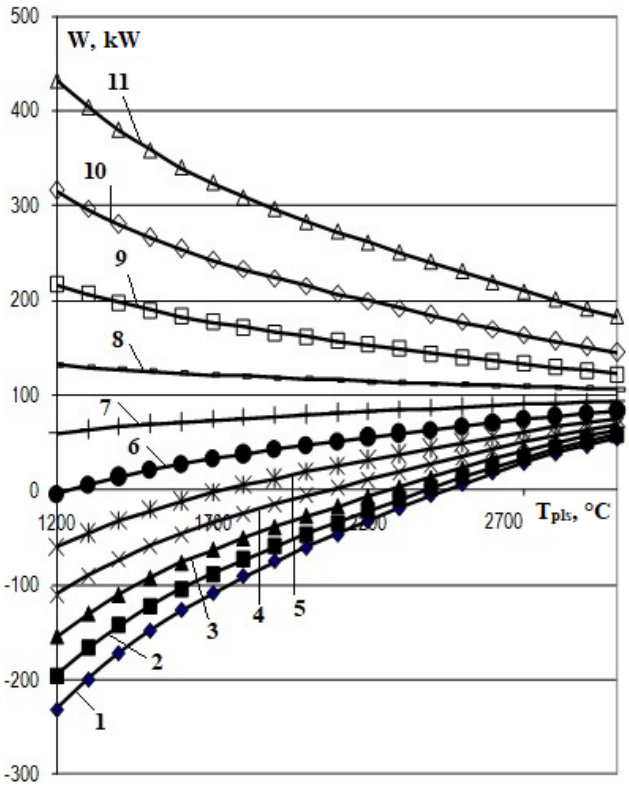


Fig. 4. Energy balance of the process of carbon oxidation by a vapor -air plasma jet at different ratios of water vapor/oxygen-enriched air: 1 – 1/0; 2 – 0,9/0,1; 3 – 0,8/0,2; 4 – 0,7/0,3; 5 – 0,6/0,4; 6 – 0,5/0,5; 7 – 0,4/0,6; 8 – 0,3/0,7; 9 – 0,2/0,8; 10 – 0,1/0,9; 11 – 0/1

The energy characteristics and equilibrium composition of the products of plastic waste processing with steam-water plasma were obtained under the following restrictions: no soot formation; all steam comes with the plasma jet.

Several calculation algorithms have been developed to calculate the recycling processes of plastic waste.

The algorithm for calculating the process of recycling waste at a given power and temperature of the plasma jet, as well as the composition of its constituents, assumes the following sequence:

1. We calculate the plasma jet's composition, total, and component consumption based on a given set of plasma-forming substances, the plasma torch's thermal power, and the plasma jet's temperature (Table 2). The following components were considered: H, H_2, H_2O, Cl, Cl_2, HCl, N_2, NH_3, Cc, CO, CO_2, CH_3, CH_4, C_2H, C_2H_2, C_2H_3, C_2H_4, C_2H_6, C_3H, C_4H_2, CHO, CH_2O, CH_2O_2, CH_2Cl, CH_3Cl, C_2HCl, CN, C_2N_2, HCN, HNC, C_3NH, C_5NH, C_7NH, C_9NH, N_2C, ClCN.

As an example, Table 2 shows various calculation options for such polymeric materials as polyethylene and polyvinyl chloride with the following parameters:

– unit capacity – up to 100 kg/h;
– plasma torch power – 100 kW;
– plasma jet temperature (T_{pls}) – 2000–3000 °C;
– water/air or oxygen-enriched air ratio of components forming the plasma jet – 0÷1 (weight fractions);
– temperature in the reaction volume (T_{rv}) – 800, 1000, 1200, 1400, 1600 °C.

2. Calculate the enthalpy values for forming processed substances.

3. Based on the given composition of the processed substances and the enthalpies of their formation (item 2) and the composition of the plasma jet at its given temperature (item 1), we calculate the parameters of the reaction products for different values of temperature in the reaction volume.

4. Based on the energy balance condition, we determined the actual temperature in the reaction volume corresponding to the thermal power of the plasma jet.

5. For the actual temperature of the reaction volume, we specified the composition of the reaction products.

When calculating the maximum plant capacity, general and additional limitations were considered.

Table 2

Calculation options for polyethylene (PE) and polyvinyl chloride (PVC)

#	PE	PVC	H_2O	O_2	T_{pls}	T_{rv}	V	H_2	CO	CO_2	N_2	HCl	Cc
	kg/h				°C		m^3/kg	Mass fractions					
1	17	8,5	27,3	-	2800	1100	9,7	0,108	0,783	0,005	-	0,094	-
2	40	20	15	-	3000	1100	7,8	0,107	0,31	-	-	0,155	0,42
3	20	10	27	6,21	2600	1200	8,4	0,07	0,57	0,014	0,25	0,07	-
4	40	20	15,5	3,6	3000	1100	7,3	0,09	0,33	-	0,13	0,13	0,32
5	30	15	34	18,8	2400	1200	8,3	0,07	0,62	0,04	0,14	0,08	-
6	42	21	15,6	8,6	3000	1200	8	0,09	0,42	-	0,07	0,13	0,29

v – specific volume of processed products, m^3/kg.

General limitations for all plant operating modes are:

a) the lower temperature of the reaction volume is the temperature below which the conversion reactions occur at a low rate, and below which waste disposal is not guaranteed;

b) the upper temperature of the reaction volume is limited mainly by the materials' heat resistance and, in some cases, by the formation of undesirable substances.

Additional limitations can be applied if a condition is imposed for the absence of the formation of certain substances, such as the presence or absence of carbon in condensed form (soot).

The algorithm for determining maximum productivity in the absence of soot formation assumes the following sequence:

1. For a sequence of plasma jet temperatures (in the range of 2000–3000 °C) and at different water/air (oxygen-enriched) ratios, the maximum (for these plasma jet parameters) amount of processed substances was selected, at which soot formation does not occur.

2. Based on the results obtained in step 1, a graph of the dependence of the maximum productivity of the installation on the plasma jet temperature is constructed. At the same time, a graph of the dependence of temperatures in the reaction volume corresponding to the maximum productivity as a function of the plasma jet temperature is constructed.

3. Based on the restrictions on the permissible range of temperature changes in the reaction volume, the allowable range of the plasma jet temperature was determined, within which the maximum possible productivity should be determined.

4. Simultaneously with the graphs of step 2, the dependences of the change in the proportion of components in the total flow of reaction products (of interest to the researcher) on the plasma jet temperature are constructed. Such graphs make it possible to introduce additional restrictions on the permissible range of change of the plasma jet, defined in step 3, where the concentration of some components goes beyond the allowable limits.

Similar graphs can be constructed for different variants of plasma-forming substance ratios.

The algorithm for determining maximum productivity without restrictions on the soot formation process is similar to the previous one. Still, the permissible range of operating parameters is significantly expanded in this case. It should be noted that the productivity of the waste processing plant increases considerably with the same nominal power as the plasma torch (100 kW).

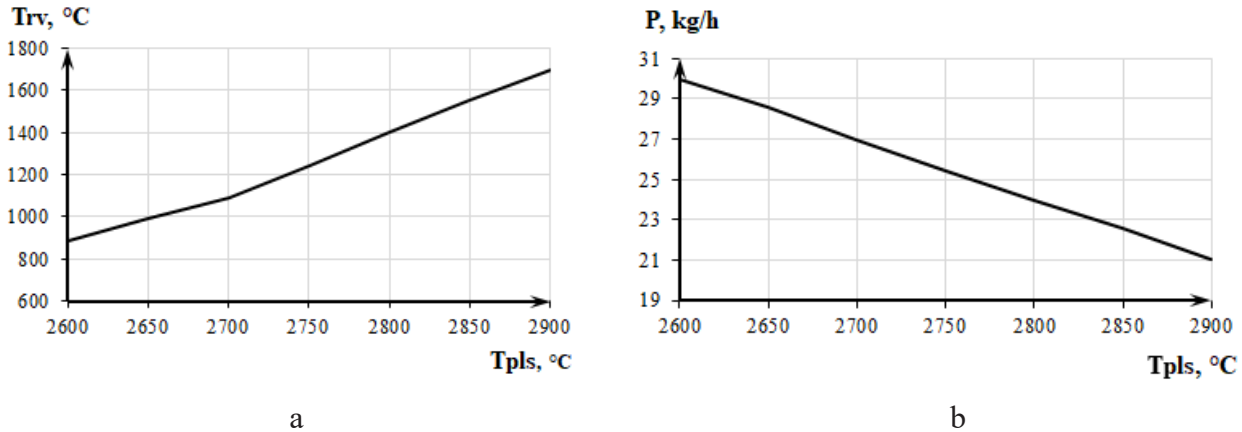
The calculations performed using the proposed algorithms obtained the dependencies presented in Figs. 5 (a, b), 6, 7, and 8.

The calculations have shown that:

1. When the amount of water vapor in the reaction space corresponds to the stoichiometry of the processed products, synthesis gas of optimal composition is formed, soot formation is excluded, and the probability of formation of undesirable harmful products (methyl chloride, etc.) is reduced. Taking this into account, an excess of water vapor is desirable.

2. Increasing the water supply with the plasma jet, with limited plasma torch power, reduces its temperature, leading to a corresponding drop in temperature in the reaction volume, slowing down endothermic reactions, i.e., decreasing plant productivity.

3. Limiting the water supply through the plasma torch (15 kg/h) with compensation for the missing water according to stoichiometry due to additional



a b

Fig. 5. Calculated dependences of the temperature in the reaction volume (a) and maximum productivity (b) on the temperature of the vapor – air plasma jet (water/air 0.8/0.2) under the condition Cc = 0

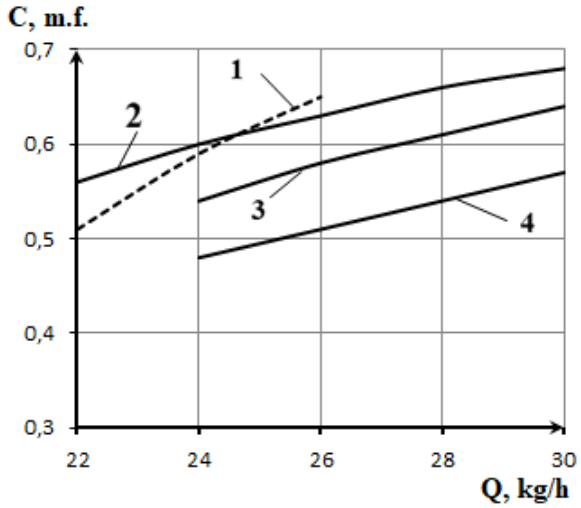


Fig. 6. Calculated dependence of CO concentration on the load at different temperatures of the vapor – air (water/air – 0.7/0.3) plasma jet: 1 – 2800 °C; 2 – 2700 °C; 3 – 2600 °C; 4 – 2500 °C

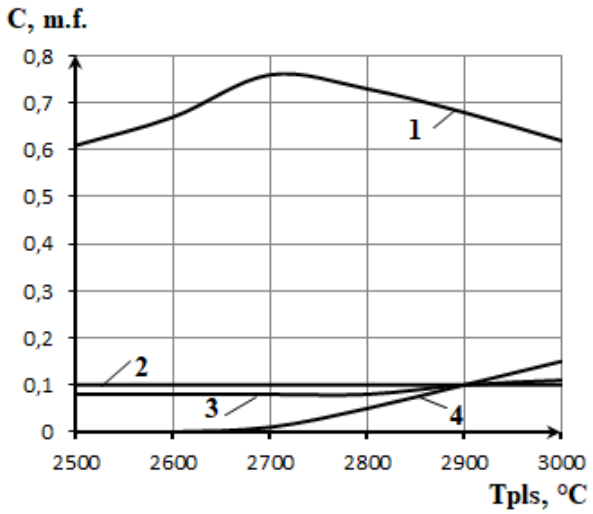


Fig. 7. Calculated dependence of the concentration of the main reaction products on the temperature of the water vapor plasma jet: 1 – CO; 2 – H_2; 3 – HCl; 4 – Cc

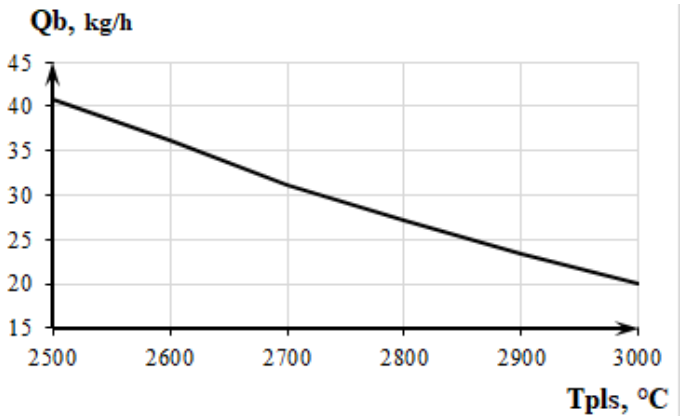


Fig. 8. Calculated dependence of water consumption on the average mass temperature of the plasma jet

superheated steam up to 500 °C does not provide a noticeable gain, since superheating steam from 100 °C to 500 °C does not require a large amount of energy (the main energy is spent on evaporation of water).

4. Removing restrictions on soot formation allows for a significant increase in the plant's productivity, but it is necessary to ensure the capture of soot particles at the outlet. In this case, soot can be considered a valuable by-product in high demand.

5. Adding air (or oxygen-enriched air) to the plasma jet in addition to water vapor, while maintaining the required balance in terms of maintaining the required temperature of the plasma jet, allows to increase the productivity of the plant due to the occurrence of oxidative (exothermic) reactions, but at the same time the quality of the synthesis gas decreases (its calorific value decreases). Naturally, when adding air to the plasma jet, especially oxygen-enriched air, the required temperature in the reaction volume can be maintained at a significantly lower (by 500–600 °C) temperature of the plasma jet.

6. When processing polymeric materials, in the absence of its own moisture, with the removal of the limitation on soot formation, the plant's productivity is 2.4 times greater than without the restriction. A separate water supply (15 kg/h with the plasma jet, and the remaining 12.3 kg/h separately at a temperature of 500 °C) is equivalent to increasing the plasma torch power by 2.7 kW, which does not provide a noticeable gain. Adding air to the plasma jet steam raises the reaction volume's temperature and increases the productivity by ~ 1.3 times and adding oxygen-enriched air increases the productivity by 2 times.

7. When processing a mixture of medical waste, provided that its own moisture is up to 20 %, the

problem of soot formation does not arise. When using steam-water plasma with a plasma torch power of 100 kW, the plant's productivity is up to 52 kg/h (considering its own moisture). When air is added to the plasma jet, productivity increases by 1.2 times; when oxygen-enriched air is added, productivity increases by 1.4 times.

Steam gasification reactions typically operate at high temperatures to achieve optimal reaction rates because they are highly endothermic. In a typical steam gasifier, at least 35 % of the feedstock must be burned to achieve the process, which results in the formation of additional harmful compounds. When considered comprehensively, plasma gasification was identified as the most environmentally friendly method for plastic waste treatment from ecology, economics, and strategic vision perspectives. A roadmap for economic and environmental vision was presented, which resulted in a financial profit with an 80 % rate of return, a payback period of 1.2 years, and a gross margin of 129 % for a 120 t/day plasma reactor [14, 15]. However, optimization is required for industrial scaling.

The energy-efficient laboratory vapor-plasma setup (Fig. 9) includes a steam plasma torch (Fig. 2a) with a power of up to 160 kW, operating on water vapor, air, and a mixture of water vapor with air or oxygen. The plasma torch is connected to the reactor tangentially to the cylindrical working chamber (Fig. 1a) through a docking device (Fig. 2 b, c). Atmospheric pressure plasma jets are the primary tool for gasification. However, the small size of atmospheric pressure plasma jets limits their use for small-scale material processing. To solve this problem, the authors developed a docking device for increasing the plasma volume without additional power sources or circuits [17].

In this case, additional gas flows are located orthogonally in the direction of jet propagation, which leads to the formation of new plasma regions along these flows. This approach increases the plasma volume, increasing the effective area available for surface interaction. The setup contains a plasma torch power source based on an adjustable thyristor rectifier with an open-circuit voltage of 600 V and an operating current of up to 300 A, waste feed and dosing mechanisms with a capacity of up to 100 kg/h, ash removal, a scrubber for cleaning synthesis gas (Fig. 1 b), and control and monitoring systems. The reactor contains a cylindrical chamber with an internal wall made of heat-insulating ceramics. Plasma is introduced above the surface of the waste material tangentially so that

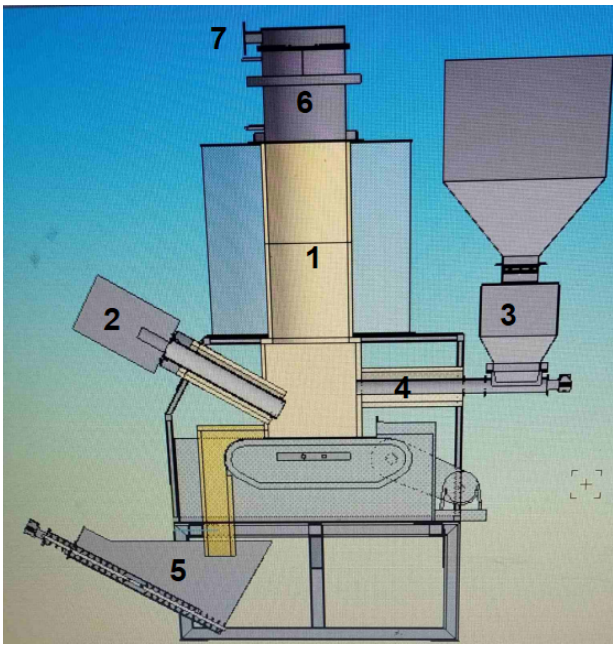


Fig. 9. Schematic diagram of the plastic gasification plant
1 – reactor; 2 – plasma torch; 3 – loading device with a system of locks; 4 – device for screw feeding of raw materials; 5 – device for removing ash; 6 – heat exchanger; 7 – device for the outlet of synthesis gas

the main heating of the material occurs by radiation from the chamber wall. Partial supply of oxidizer (superheated water vapor with oxygen or air) occurs through the grate. At the reactor outlet, a heat exchanger (gas-water) is provided for the recovery of thermal energy of the outgoing synthesis gas. Crushed plastic waste is fed to the movable grate by a screw feeder. A sluice gate is provided to prevent the release of flammable gases. The temperature of the gases leaving the reactor is maintained at 800–1200 °C by regulating the arc current of the plasma torch. Before switching on the waste feed, the reactor is heated to a wall temperature of 1300–1500 °C by a plasma torch operating in air. Switching to water vapor or a mixture of steam and oxygen occurs with waste feed. The reactor operates with an excess pressure of 20–50 Pa. Slag is removed through a water seal, eliminating atmospheric air suction.

The gasification of plastic waste (a mixture of polyethylene with polyvinyl chloride at a ratio of 2:1) was carried out in three variants: using only water vapor, a mixture of water vapor with air, and a mixture of water vapor with air enriched with oxygen to 50%. In all cases, the consumption of plastic waste was maintained to exclude soot formation.

The required operating mode was preliminarily assessed visually based on the absence of smoke in

a b

Fig. 10. Vapor plasma gasification of plastic waste in a laboratory setup with a 1.5 kW plasma torch, reactor wall temperature at the outlet is 950 °C: a – lack of vapor (presence of soot formation), b – stoichiometric ratio (absence of soot formation)

the laboratory reactor's exhaust gases (Fig. 10 a, b) using a 1.5 kW vapor plasma torch.

Vapor plasma gasification has been studied in general, and the results of thermodynamic calculations agree with the experiment in a thermally insulated reactor under kinetic conditions. A description of energy-efficient vapor plasma technologies for processing plastic waste can be found in [16–18]. Plastic gasification is a fast reaction at optimal temperatures with a residence time of up to 1 sec for volatile products. However, scaling is limited by increasing the required plasma torch power with increasing process productivity. Heat recovery from exhaust gases at the reactor inlet is also useful. Perhaps the only solution to the problem is to combine the thermal energy introduced into the reactor from the plasma torch and partially oxidize the raw material with air (oxygen-enriched air or oxygen). It is noteworthy that in this case, a combined two-stage process can be implemented in one reactor. The plasma energy mainly provides effective high-temperature (1300–1500 °C on the reactor wall) conversion of solid waste into the gas phase with a dispersed component in the form of a vapor phase of decomposition products, soot and resinous compounds. This entire mixture is converted to synthesis gas with a temperature of 900–1100 °C at the reactor outlet. In this case, nitrogen and carbon dioxide will appear in significant quantities in the synthesis gas, and the percentage of hydrogen will decrease. However, this mode allows for the increase of reactor productivity without soot formation and, as a result, an increase in the synthesis gas yield with a decrease in the required specific power. The results of experiments on the gasification of a mixture of polyethylene with polyvinyl chloride in a reactor (Fig. 1) are shown in Fig. 11. The useful power of the plasma jet was maintained at 100 kW for three operating modes:

1. working gas – water vapor 27 kg/hour, productivity 25 kg/hour (curves 1.1 and 2.1 in Fig. 10);
2. working gas – water vapor 27 kg/hour + air 27 kg/hour, productivity 35 kg/hour (curves 1.2 and 2.2 in Fig. 10);
3. working gas – water vapor 34 kg/hour + air enriched with oxygen 0.5/0.5 34 kg/hour, productivity 45 kg/hour (curves 1.3 and 2.3 in Fig. 10).

As Fig. 11 shows, regulating water vapor has virtually no effect on the output of hydrogen and carbon monoxide but serves to suppress soot formation and the output of resinous compounds. The relative amount of H_2 and CO decreases, the ratio remains

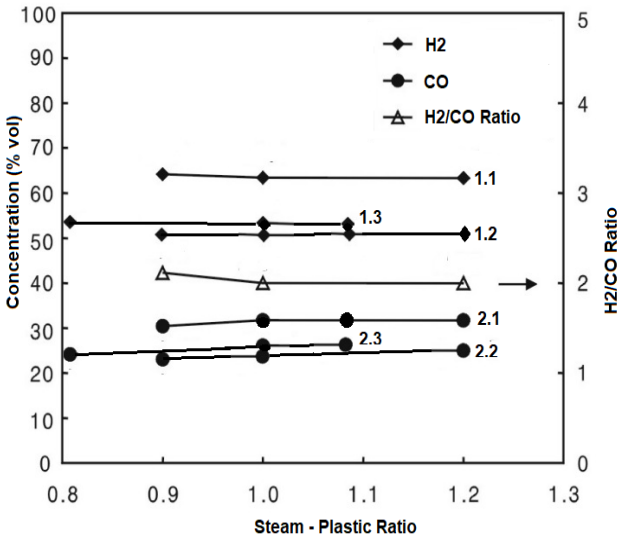


Fig. 11. Concentrations of H_2 and CO gases depending on the modes of vapor plasma gasification of a mixture of polyethylene with polyvinyl chloride in accordance with Table 2: 1.1, 2.1 – vapor plasma gasification; 1.2, 2.2 – plasma gasification in a mixture of vapor with air; 1.3, 2.3 – plasma gasification in a mixture of vapor with oxygen-enriched air

virtually unchanged, and the production of synthesis gas increases.

Generally, the first phase of solid gasification involves heating, evaporation, and reaction of carbon with air, oxygen, and vapor at a temperature of 400–700 °C or higher, providing the necessary heat from plasma and exothermic reactions. Using a vapor plasma gasification system, plastic waste is decomposed to form hydrogen (~ 60 %) and CO (~ 30 %) at the reactor outlet with a steam/plastic ratio of (~ 1/1) at a temperature of ~ 1000 °C using an electric arc vapor heater.

Conclusions. A unit for the gasification of plastic waste using plasma has been developed and studied. Water vapor, air, and mixtures of water vapor with air and oxygen were used as working gases during plastic gasification. The geometric dimensions of the reactor working chamber were determined considering the requirement for the time of complete disinfection of hazardous medical plastic waste in the high-temperature zone. The effect of operating conditions on the productivity of the gasification plant was studied, and the composition and yield of synthesis gas were estimated. It was shown that the process occurs without soot formation with excess water vapor. Increasing the vapor supply and temperature can improve gasification's reactivity and productivity.

The sustainability of any plastic waste management system depends on many factors. When selecting the latest technologies, plasma gasification should be considered a leading waste management option. There is experience and great potential for developing and applying plasma gasification technology with energy recovery. Undoubtedly, vapor plasma gasification can be developed into an industrial technology for recycling plastic waste into hydrogen-rich synthesis gas. Complex waste can be converted into usable energy products. However, if the safety issues of plasma gasification technologies have a positive answer, then whether they can be made reasonable awaits their solution, since these approaches so far lead to the exploitation of more natural resources rather than resource and energy conservation. The plasma gasification reactor should be designed in such a way that it is suitable for mixed plastic waste from small and medium production. In addition, technology optimization should reduce capital investment and operating costs and thus increase the economic viability of the process.

Thus, plastic gasification may be a promising method for reducing environmental pollution and generating energy. The resulting synthesis gas can be converted into heat, electricity, biofuel, hydrogen, biomethane, etc.

Bibliography:

1. Nayanathara Thathsarani Pilapitiya P.G.C., Ratnayake A.S. The world of plastic waste: Areview. *Cleaner Materials*, 2024. Vol. 11, 100220. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220

2. Stubbins A., Law K.L., Muñoz S.E., Bianchi T.S., Zhu L. Plastics in the earth system. *Science*, 2021. Vol. 373, № 6550. P. 51–55. DOI: 0.1126/science.abb0354

3. Gallo F., Fossi C., Weber R., Santillo D., Sousa J., Ingram I., Nadal A., Romano D. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. *Environmental Sciences Europe*, 2018. Vol. 30, № 13. DOI: https://doi.org/10.1186/s12302-018-0139-z

4. Law K. L., Starr N., Siegler T.R., Jambeck J.R., Mallos N.J., Leonard G.H. The United States' contribution of plastic waste to land and ocean. *Science Advances*, 2020. Vol 6, № 44:eabd0288. DOI: 10.1126/sciadv.abd0288

5. Shonfield P. LCA of Management Options for Mixed Waste Plastics. Final Report. Project code: MDP017. 2008. URL: https://surli.cc/jbfzzl (дата звернення: 10.10.2024).

6. Patni N., Shah P., Agarwal S., Singhal P. Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels. *Hindawi Publishing Corporation*, 2013. Vol. 2013, № 1. DOI: http://dx.doi.org/10.1155/2013/902053

7. Saebea D., Ruengrit P., Arpornwichanop A., Patcharavorachot Y. Gasification of plastic waste for synthesis gas production. 6th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2019, 22–25 July, University of Aveiro, Portugal. *Energy Reports*, 2020. Vol. 6. P. 202–207. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.043

8. Brems A., Dewil R., Baeyens J., Zhang R. Gasification of plastic waste as waste-to-energy or waste-to-syngas recovery route. *Natural Science*, 2013. Vol. 5, № 6. P. 695–704. DOI: http://dx.doi.org/10.4236/ns.2013.56086

9. Mączka T., Śliwka E., Wnukowski M. Plasma gasification of waste plastics. *Journal of Ecological Engineering*, 2013.Vol. 14, № 1. P. 33–39 DOI: 10.5604/2081139X.1031534

10. Dave P. N., Joshi A. K. Plasma pyrolysis and gasification of plastics waste – a review. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2010. Vol. 69, № 3. P. 177–179.

11. Shah H.H., Amin M., Iqbal A., Nadeem I., Kalin M., Soomar A.M., Galal A.M. A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. *Frontiers in Chemistry*, 2023. Vol. 10:960894. DOI: 10.3389/fchem.2022.960894

12. Patel N. A. Assessment of Plasma Assisted Gasification for Effective Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste Treatment. Polytechnic Institute Hartford. 2012. 13 p.

13. Salaudeen S.A., Arku P., Dutta A. 10 – Gasification of Plastic Solid Waste and Competitive Technologies. In: Al-Salem, S.M., Ed., Plastics to Energy: *Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications*, William Andrew, Norwich, 2019. P. 269–293. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00010-8

14. Galaly A.R., Oost G.V., Dawood N. Sustainable Plasma Gasification Treatment of Plastic Waste: Evaluating Environmental, Economic, and Strategic Dimensions. *ACS Omega*, 2024. Vol. 9, № 19. P. 21174−21186. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01084

15. Galaly A.R., Dawood N. Energy Recovery and Economic Evaluation for Industrial Fuel from Plastic Waste. *Polymers*, 2023. Vol. 15, № 11, 2433. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15112433

16. Петров С.В., Жовтянський В.А. Енергоефективні пароплазмові технології переробки відходів. Київ: Наукова думка, 2019. 559 с.

17. Petrov S., Stukhlyak P., Bondarenko S., Roshanpour S., Ganczarski M. Steam plasma gasification of biomass using electrodeless plasmatrons. *The Paton Welding Journal*, 2024. № 6. P. 20–28. DOI: 10.37434/tpwj2024.06.03

18. Process for converting plastic waste into power: Patent 5369947 USA: Filed: September 13, 1993, Date of Patent: December 6, 1994, Assignee: Bayer Aktiengesellschaft. URL: https://patents.justia.com/patent/5369947 (дата звернення: 15. 01.2025).

Петров С.В., Бондаренко С.Г., Сангінова О.В., Колесник В.В., Орлик В.М., Ганчарський М., Рой Е.

ПАРОПЛАЗМОВА ГАЗИФІКАЦІЯ ПЛАСТИКА

Зростання споживання пластику призводить до постійного збільшення потоку відходів з високим вмістом пластмас. Пластикові відходи майже повністю виготовлені з первинної сировини на основі викопного палива, тому пластик переробляють або утилізують. При цьому особливу групу складають медичні відходи, які відносяться до токсичних та небезпечних матеріалів, що підлягають їхньому додатковому знезараженню при переробці та утилізації. Пластик є одним із найбільш широкодоступних джерел енергії, газифікація якого дозволяє перетворити його на горючі гази. У статті розглянуто плазмовий метод газифікації пластикових твердих відходів. Для реалізації плазмового методу переробки пластикових відходів, у тому числі і небезпечних медичних відходів, створено лабораторну установку, призначену для переробки відходів з використанням плазми, а також для дослідження процесу газифікації. Як робочі гази при газифікації пластику використовувалися водяна пара, повітря і суміші водяної пари з повітрям і киснем. У плазмовому реакторі використовувалися парові електродугові плазмотрони у різному виконанні потужністю до 160 кВт. При виборі геометричних розмірів робочої камери реактора враховано вимогу, що час перебування продуктів переробки в зоні високих температур має бути не менше часу, достатнього для повного знезараження інфекційних агентів. Цей час визначено з використанням рівняння кінетики процесу знезараження. Розрахунок параметрів процесу газифікації виконано за допомогою автоматизованої системи термодинамічних розрахунків. В результаті проведених розрахунків визначено енергетичні характеристики та рівноважний склад продуктів переробки пластмасових відходів у пароводяній плазмі. Проведені розрахунки дозволили визначити необхідні вимоги ефективного ведення процесу газифікації пластику. Попередньо потрібний режим роботи оцінювали на лабораторному реакторі меншого масштабу при використанні парового плазмотрона потужністю 1,5 кВт. Показано, що результати термодинамічних розрахунків добре збігаються з експериментом у теплоізольованому реакторі та при виконанні кінетичних умов. Оптимізація процесу плазмової газифікації дозволить розвинути їх у промислову технологію переробки пластикових відходів з отриманням синтезу газу, збагаченого воднем.

Ключові слова: *переробка пластику, пароплазмова газифікація пластику, синтез газ, плазмові технології, знезараження, термодинамічні розрахунки, розрахунковий алгоритм.*

УДК 546.57:541.64:661.183.2:577.152.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/35

Скиба Ю.М.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скиба М.І.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Коваленко І.Л.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСТРАКТІВ, ОТРИМАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ ГЛИБОКИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ

У статті здійснено дослідження ефективності використання екстрактів, отриманих у середовищі низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР) на основі холін хлориду для синтезу стабільних дисперсій наночастинок золота. НЕР на основі хлориду холіну було використано як нову альтернативу традиційним розчинникам для ультразвукової екстракції речовин з рослинної сировини, зокрема на прикладі шкірки банану (Musaceae). Методом теоретичних розрахунків із використанняи Analytical GREEnness calculator здійснено порівняння екстракції із використанням НЕР та традиційною екстракцією етанолом/водою. Наночастинки золота були синтезовані шляхом відновлення водного розчину гідрату тетрахлораурату (III) водню ($HAuCl_4 \cdot 3H_2O$) з використанням отриманих екстрактів НЕР трьох типів: холін хлорид : ксилітол, холін-хлорид : пролін, холін хлорид : сечовина. Було встановлено, що вміст екстрагованих флавоноїдів, за допомогою досліджуваних складів НЕР на основі холін-хлориду становить 70–460 мг ЕК/100 г і залежить від складу НЕР. Визначене значення антиоксидантної активності одержаних екстрактів становив методом DPPH ((2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил)) становив НЕР-1 (50 мгЕАК/100 г) > НЕР-2 (300–340 мгЕАК/100 г) > НЕР-3 (450–460 мгЕАК/100 г). Було встановлено, що екстракти бананової шкірки, отримані у досліджуваних середовищах НЕР, дозволяють синтезувати сферичні наночастинки золота (Аи НЧ). Одержані наночастинки характеризуються максимальним піком плазмонного резонансного поглинання приблизно при λ = 550–565 нм з А = 0,2–0,5 від. од. до 1,8–2,0 при збільшенні вихідної концентрації іонів золота з 0,3 ммоль/л до 3,0 ммоль/л. Встановлено, що технологічно доцільні параметри синтезу: співвідношення розчину прекурсору з екстрактом НЕР 1:10 (об'єм/об'єм), τ = 30–60 хв при температурі 50–60 °С. Методом динамічного світлорозсіювання встановлено, що діапазон середнього розміру наночастинок становить 50–61 нм. Встановлено, що дисперсії одержані в середовищі НЕР є стабільними до агрегації, про що свідчать значення дзета-потенціалу ζ= –33 ÷ –36 мВ.

Ключові слова: *металічні наночастинки, характеристика, оптичні властивості, стабільність, синтез, низькотемпературний евтектичний розчинник, екстракти.*

Постановка проблеми. Наночастинки благородних металів завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям знаходять широке застосування в різних галузях промисловості. Серед них особливу увагу привертають наночастинки золота, які демонструють широкий спектр функціональних характеристик, зокрема каталітичну активність, біосумісність, антиоксидантні властивості, і мають високий потенціал для використання в харчовій промисловості, біомедичних технологіях, медицині, фармацевтиці, каталізі, косметології тощо [1–2]. Тому за даними маркетингових досліджень (рис. 1) глобальний ринок дисперсій наночастинок золота у 2024 році оцінювався приблизно в 0,13 млрд доларів США, а до 2033 року очікується, що він досягне 0,36 млрд доларів США, зростаючи зі сукупним річним темпом зростання (CAGR) близько 12,4% з 2025 по 2033 рік. У зв'язку з цим активно зростає інтерес до вивчення методів одержання наночастинок металів, серед яких особливої популярності набувають не лише фізичні та хімічні підходи, а й екологічно безпечні методи «зеленого» синтезу [1–3].

На сьогодні зелений синтез базується переважно на використанні рослинних екстрактів,

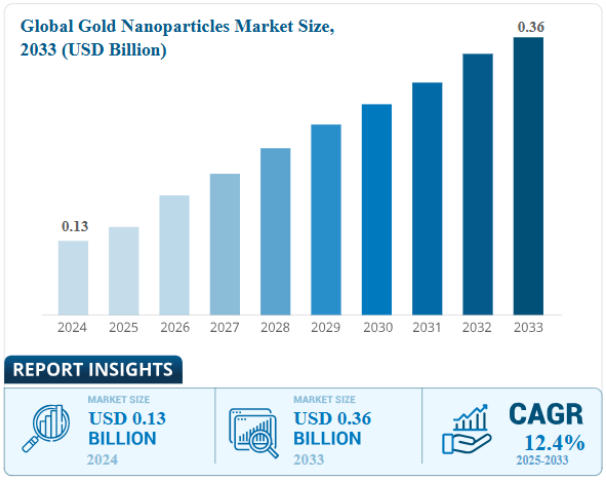


Рис. 1. Маркетингові дослідження сучасного стану та перспектив ринку дисперсій наночастинок золота

отриманих з широкого переліку природньої рослинної та/або агросировині (аграрних відходів). Ці біологічні матеріали містять поліфенольні сполуки, які вилучені в екстракти здатні відновлювати іони металів, сприяючи утворенню наночастинок за умов контролю параметрів синтезу. Ключовим параметром, що забезпечує ефективність та контролює фізико-хімічні параметри наночастинок є якісний та кількісний склад екстрагованих сполук [4, 5]. Останній напряму залежить від типу екстракції, розчинника та параметрів екстракції.

Серед альтернатив до традиційних токсичних розчинників дедалі більшої популярності набувають екологічно безпечні системи, зокрема низькотемепратурні евтектичні розчинники (НЕР) на основі холін хлориду. У поєднанні з відповідними донорами, такими як органічні кислоти чи поліоли, він утворює стабільні евтектичні суміші. Вони привертають увагу завдяки своїй низькій токсичності, біорозкладності та доступності [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдяки своїй здатності створювати екологічно чисті, стабільні та високоефективні розчинники, системи на основі хлориду холіну вважаються ідеальними для «зеленого» виділення поліфенольних сполук. Відтак автори [2, 3, 6, 7] оцінили використання глибоких евтектичних розчинників на основі ([Ch]Cl) та карбоновими кислотами, для екстракції фенольних сполук з листя оливи. Ці екстракти потім порівнювали з екстрактами, отриманими з використанням етанолу. Доведено, що ефективність НЕР перевищує навіть такі традиційні розчинники, як вода, етанол, метанол та їх суміші – за більшістю показників вони перевершують навіть 30% етанол [6–9]. Результати авторів [2, 3] показали, що найбільш придатними природними низькотемпературними евтектичними розчинниками (NADES) для екстракції біологічно активних сполук є суміші холін хлориду з яблучною кислотою (ChCl:яблучна кислота) (загальний вміст фенольних сполук: 1053 мг галової кислоти еквівалент (ГАК)/100 г; загальний вміст флавоноїдів (ЗВФ): 94,7 мг/100 г; антиоксидантна активність (АК): 430 мг/100 г) та хлориду холіну з гліцерином (ChCl:Gly) (ЗВФ: 169 мг/100 г; АК: 416 мг/100 г).

Окрім застосування для екстракції, НЕР набули поширення і як середовище для «зеленого» синтезу наночастинок. Зокрема, розчинники, створені на основі хлориду холіну та донора водневих зв'язків, виявилися ефективним і доступним підкласом іонних рідин із низьким впливом на довкілля [7, 10]. Їхня здатність добре розчиняти метали робить такі системи придатними для синтезу наноматеріалів з високим екологічним потенціалом. В роботі авторів [10] було здійснено добір складових для синтезу екологічних іонних на основі квантово-хімічних розрахунків, серед яких і склади НЕР на основі холін хлориду: холін хлорид : ксилітол; холін-хлорид : пролін; холін хлорид:сечовина. Проте наразі відсутні данні їх ефективності як екстрагентів біологічно активних сполук та середовищ синтезу наночастинок золота.

Банани (Musaceae) належать до провідних сільськогосподарських культур світу як за обсягами виробництва, так і за рівнем торгівлі, що постійно зростають задля задоволення глобального попиту. Одним із основних побічних продуктів переробки бананів є бананова шкірка, яка становить приблизно 35% маси плоду. Згідно з сучасними дослідженнями, бананова шкірка є цінним джерелом біоактивних речовин. Ці компоненти можуть бути ефективно екстраговані та застосовані для синтезу наночастик золота [11].

Постановка завдання. Тому мета роботи – встановити ефективність різних складів глибоких евтектичних розчинників (ГЕР) на основі хлориду холіну для екстракції біоактивних сполук із рослинної сировини, а також оцінити придатність отриманих екстрактів для синтезу наночастинок золота.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень**.**

Низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) на основі холін хлориду та ксилітолу,

проліну або сечовини готували у молярному співвідношенні 1:1 шляхом нагрівання суміші до 60–80 °С з перемішуванням до утворення гомогенного розчину. Для ультразвукової екстракції наважку подрібненої банановой шкірки змішували з НЕР при співвідношенні Т:Р = 1:45. Після цього суміш обробляли ультразвуком на частоті близько 40 кГц протягом досліджуваного інтервалу часу (10–30 хвилин) при температурі 30–40 °С. Після екстракції отриману суміш центрифугували та фільтрували для відокремлення твердих часток і отримання прозорого екстракту для подальшого використання. Для одержання НЕР зважені маси заданих інгредієнтів змішували в лабораторному стакані за допомогою магніту та поміщали на магнітну мішалку при температурі 60–80 °С.

Для визначення загального вмісту флавоноїдів 0,5 мл екстракту змішували зі 1,5 мл 96% етанолу, 0,1 мл 10% розчину хлориду алюмінію, 0,1 мл 1 М розчину ацетату калію та 2,8 мл дистильованої води у скляній пробірці. Контрольний зразок готували за аналогічною процедурою, проте замість хлориду алюмінію додавали 0,1 мл дистильованої води. Після 30 хвилин інкубації проводили вимірювання оптичної щільності при довжині хвилі 415 нм. Для побудови калібрувальної кривої використовували стандартні розчини кверцетину з концентраціями у межах 10–100 мг/л. Отримані результати виражали у г еквівалентів кверцетину на 100 г сухої маси зразка (мг ЕК/100 г).

Таблиця 1

Склад НЕР, що використовували для екстракції та синтезу наночастинок золота [10]

Склад НЕР	Склад	Молярне співвідношення
НЕР 1	Холін хлорид : ксилітол	5:2
НЕР 2	Холін-хлорид : пролін	1:1
НЕР 3	Холін хлорид:сечовина	1:2

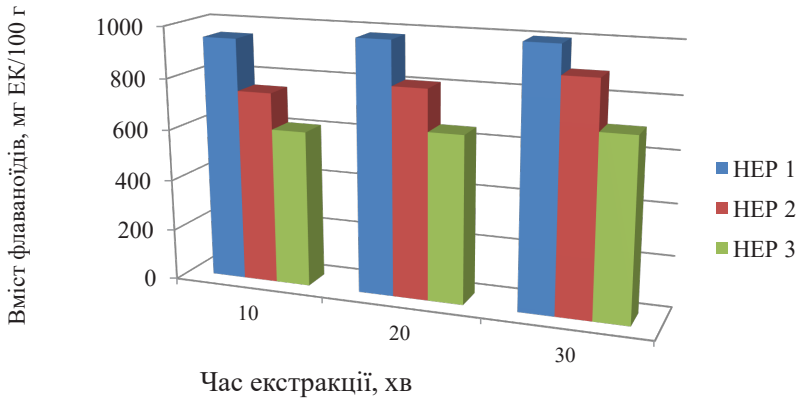
Антиоксидантну активність зразків оцінювали відносно стандартної кривої для аскорбінової кислоти метод з DPPH [12] у мг еквівалентів аскорбінової кислоти на 100 г зразка.

Для одержання розчину наночастинок золота гідрохлорид золота (III) ($HAuCl_4 \cdot xH_2O$) розчиняли у деіонізованій воді до отримання розчину з концентрацією 1–3,0 мМ. Синтез наночастинок золота здійснювали шляхом змішування розчину прекурсору з екстрактом НЕР у співвідношенні 1:10 (об'єм/об'єм), після чого реакційну суміш нагрівали до 60–80 °С при постійному перемішуванні. Про формування наночастинок наночастинок золота свідчить зміна забарвлення розчину від блідо-жовтого до рожевого-червоного або фіолетового кольору, що характерно плазмонному резонансу поверхні (ППР). Оптичні спектри колоїдних розчинів реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-5800PC (поглинання в діапазоні 190–700 нм) з використанням кварцових кювет. Величину дзета-потенціалу колоїдних систем визначали методом електрофоретичного руху частинок на приладі Zetasizer Nano-25 (Malvern Instruments Ltd., Малверн, Великобританія) для оцінки стабільності наночастинок у розчині.

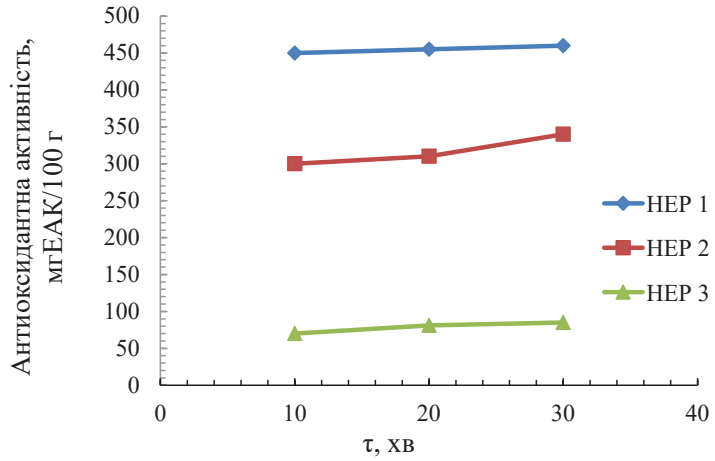
Для перевірки достовірності експериментальних даних всі дослідження проводили мінімум три рази. Отримані результати оброблювали за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel.

Отримані експериментальні результати. Існує взаємозв'язок між високою антиоксидантною активністю екстракту та його відновлювальною здатністю під час синтезу наночастинок (НЧ). У низці досліджень [5, 8–10] встановлено позитивну кореляцію між загальним вмістом фенольних сполук, вмістом флавоноїдів та ефективністю «зеленого» синтезу наночастинок [1–5, 7, 8–10]. Екстракти з вищою антиоксидантною активністю за методами DPPH ((2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил)), ABTS (2,2′-азино-біс (3-етилбензотіазолін-6-сульфонова кислота), FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power), як правило, забезпечують утворення менших за розміром, стабільніших наночастинок із кращим ступенем диспергування. Дослідження із використанням рослинних екстрактів показали, що екстракти з вищим вмістом флавоноїдів (визначеним у мг КЕ/г або мг КЕ/л) демонструють сильнішу відновну здатність, що зумовлює швидший перебіг реакції та більш однорідне формування наночастинок золота (Au НЧ).

Тому, було досліджено ефективність відібраних складів НЕР на кількісні значення екстракції флавоноїдів та значення антиоксидантної активності. Також було проведено дослідження з метою оптимізації процесів екстракції (часу екстракції досліджуваної сировини). У дослідженні було розглянуто, як час екстракції впливають на концентрацію екстрагованих флавоноїдів, а також на антиоксидантну активність (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Вміст флавоноїдів в екстрагованих НЕР (а) та антиоксидантна активність (б) екстрактів шкірки банану (Musaceae) залежно від часу екстракції та складу НЕР

Аналіз одержаних даних свідчить, що всі досліджувані склади НЕР є ефективними для екстрагування фенольних сполук. Відтак, після 10–30 хв ультразвукової екстракції загальний кількісний показник становить на рівні 600–1000 мг ЕК/100 г із зниженням в ряду: НЕР1 > НЕР 2 > НЕР 3.

Цілком закономірним є збільшення ступеня екстракції фенольних сполук при збільшенні тривалості екстракції від 10 до 30 хв, оскільки за довшого часу екстракції зростає контакт між розчинником (НЕР) та рослинною сировиною, що сприяє глибшому проникненню розчинника в клітинні структури та вивільненню більших кількостей біоактивних речовин. Крім того, тривалiша дія ультразвуку покращує руйнування клітинних стінок, що також підсилює масоперенос і сприяє вищому виходу екстрагованих фенолів.

Аналіз даних визначеної антиоксидантної активності (рис. 2 б) корелює із вмістом фенольних сполук і зберігається її зниження в ряду: НЕР1 (50 мгЕАК/100 г) > НЕР 2 (300–340 мгЕАК/100 г) > НЕР 3 (450–460 мгЕАК/100 г). Антиоксидантна активність екстракту банановї шкірки в середовищі НЕР 3 холін хлорид : сечовина є найнижчою (приблизно вдвічі нижчою, ніж у середовищах холін хлорид : ксилітол та холін-хлорид : пролін) вірогідно пов'язана з його нижчою здатністю до екстрагування фенольних сполук, відсутністю власного антиоксидантного ефекту та меншою ефективністю проникнення в клітини рослинної тканини. Високі показники екстрактивної активності флаваноїдів складу НЕР 1 (холін хлорид : ксилітол) вірогідно, зумовлені рядом факторів: численними гідроксильними групами ксилітолу,

потужною водневою зв'язувальною здатністю суміші, оптимальною полярністю для фенолів, а також збалансованою в'язкістю, що покращує контакт розчинника з твердим матеріалом.

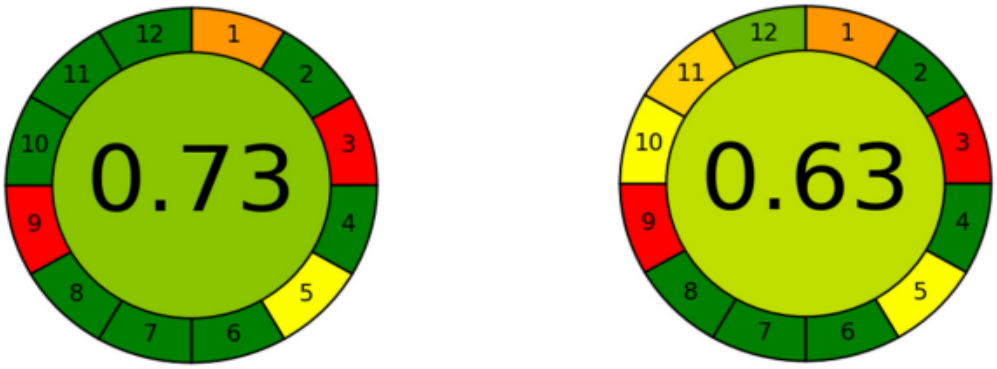
Щоб показати перевагу екстракції із використанням НЕР з точки зору сталого розвитку та екологічності, цей метод було порівняно з традиційним екстрагуванням при використанні водно-етанольного розчинника і проаналізовані за допомогою програмного забезпечення AGREE (Analytical GREennEss calculator) [13]. Це програмне забезпечення дозволяє нам оцінювати, від 0 до 1, екологічність аналітичних процедур, враховуючи 12 принципів зеленої аналітичної хімії. Як видно з рисунка 3, екстракція за допомогою НЕР досягає кращого загального балу за екологічністю, що показує, що цей метод є більш екологічним та безпечним для здоров'я людини та екосистеми, ніж той, що використовує звичайні гідроорганічні розчинники.

Ефективність отриманих екстрактів на основі НЕР для синтезу та стабілізації наночастинок золота досліджували шляхом відновлення прекурсора наночастинок золота різної початкової концентраціх без додавання додаткових реагентів відновників/стаблізаторів.

З одержаних спектрів видно, що в досліджуваному діапазоні початкових концентрацій (0,3–3,0 ммоль/л) розчинів прекурсору та часовому інтервомі синтезу результатом є формування наносистем, а саме наночастинок золота. Характерною ознакою наночастинок золота, є наявність вираженого одного максимуму поглинання на лінії ППР ($\lambda_{макс}$) в діапазоні λ = 520–580 нм. Відповідно до загальновідомих положень [5–10], максимум в цьому діапазоні відповідає НЧ золота сферичної форми. Одночасно якісним підтвердженням одержання наночастинок золота в розчинах є забарвлення розчинів у рожево-фіолетові кольори різної інтенсивності, що свідчить про утворення колоїдів золота.

Одержані спекти синтезованих дисперсій золота (рис. 4) показують, що досліджувані екстракти, одержані на основі НЕР 1 та НЕР 1 відновлюють іони золота та утворюють наночастинки золота, з формуванням характерних піків при λ = 550–570 нм протягом досліджуваного періоду синтезу 10–60 хв. За взаємозв'язком між оптичними властивостями наночастинок золота (смуги ЛППР), поверхневими характеристиками та розподілом НЧ за розмірами експериментально визначено основні закономірності формування НЧ та їх характеристики.

Встановлено, що закономірним є збільшення поглинання з 0,2–0,5 від. од. до 1,8–2,0 при збільшенні вихідної концентрації іонів золота з 0,3 ммоль/л до 3,0 ммоль/л, і у всіх випадках екстракт складу НЕР 1 є більш ефективним у порівнянні з НЕР 1. При використанні екстрактів на основі НЕР 1, 2 середній розмір НЧ в дисперсії оцінений по значенню положення піку $\lambda_{макс}$ЛППР спектрів (рис. 4) становить ~55–60 нм. Проте, додатковий аналіз одержаних дисперсій методом скануючої мікроскопії (СЕМ) (рис. 5) з додатковим розподіленням за



а) б)

Рис. 3. Діаграми, отримані за допомогою AGREE:
(а) екстракція із використанням НЕР та (б) екстракція при використанні етанолу/води.
Ідентифікація номерів: 1 – уникнення обробки зразків; 2 – мінімальний розмір зразка;
3 – вимірювання in situ; 4 – збереження реагентів; 5 – автоматизовані та мініатюризовані методи;
6 – уникнення дериватизації; 7 – уникнення відходів; 8 – багатоаналітичні методи; 9 – мінімізація енергії;
10 – реагенти з відновлюваних джерел; 11 – усунення токсичних реагентів; 12 – безпека оператора

розміром свідчить про нижчий розмір утворених наночастинок вдисперсії $d_{ср}$ = 25–31 нм. Встановлено, що одержані системи НЧЗ стабільні та не схильні до агрегації. Відтак ζ – потенціал становить –28,0 та –36,8 мВ, відповідно.

Висновки. Для синтезу стабільних дисперсій наночастинок золота успішно застосовано екстракти, отримані за допомогою низькотемпературних евтектичних розчинників на основі холін хлориду. Низькотемпературні евтектичні розчинники з композиціями холін хлорид:ксилітол, холін хлорид:пролін та холін хлорид : сечовина ефективно використовувалися для ультразвукової екстракції активних речовин із бананової шкірки, замінюючи традиційні розчинники. Вміст флавоноїдів у отриманих екстрактах становив від 70 до 460 мг еквіваленту катехіну на 100 г сировини, залежно від складу розчинника.

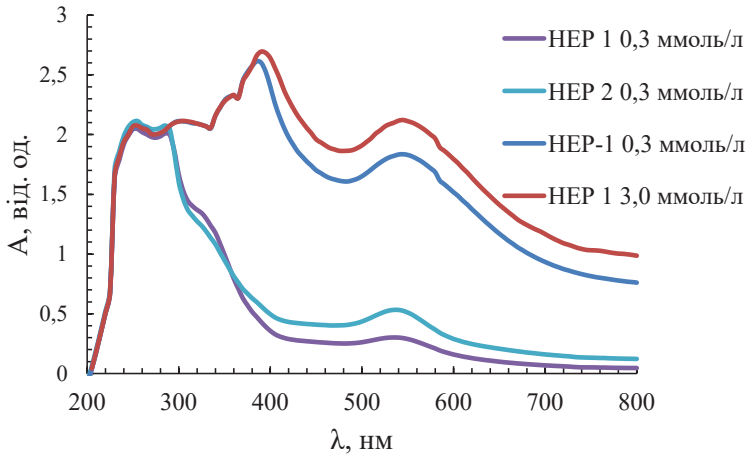


Рис. 4. Спектри наночастинок золота, одержаних із застосуванням екстрактів шкірки банану, отриманих у середовищі глибоких евтектичних розчинників різних складів (НЕР 1: Холін хлорид : ксилітом, НЕР 2: Холін-хлорид : пролін) при різних початкових концентраціях Au^{3+} ммоль/л

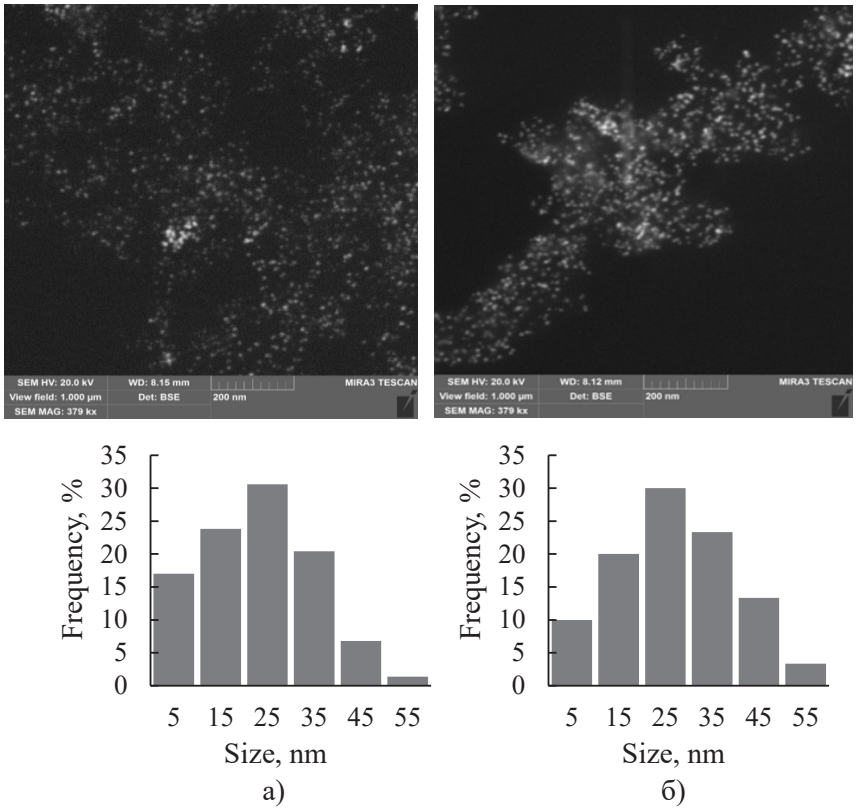


Рис. 5. Зображення скануючої мікроскопії та діаграми розподілення наночастинок за розміром, синтезовані із застосуванням екстрактів шкірки банану, отриманих у середовищі глибоких евтектичних розчинників (НЕР 1: холін хлорид : ксилітом (а), НЕР 2: холін-хлорид : пролін (б))

Використання цих екстрактів дозволило синтезувати сферичні наночастинки золота з максимальним піком плазмонного резонансного поглинання у діапазоні 550–565 нм, інтенсивність якого зростала при підвищенні концентрації іонів золота від 0,3 до 3,0 ммоль/л. При використанні екстрактів на основі НЕР 1, 2 середній розмір НЧ в дисперсії оцінений по значенню положення піку $\lambda_{макс}$ЛППР спектрів становить ~55–60 нм, за результатами методу СЕМ з розподіленням за розміром $d_{ср}$ = 25–31 нм. Стабільність одержаних дисперсій підтверджена визначеним значенням дзета-потенціалу і становить –33 до –36 мВ, що залежало від типу НЕР. Отже, застосування низькотемпературних евтектичних розчинників на основі холін хлориду є перспективним екологічно чистим підходом для отримання стабільних наночастинок золота із рослинних відходів.

Список літератури:

1. Duman H., Akdaşçi E., Eker F., Bechelany M., Karav S. Gold nanoparticles: Multifunctional properties, synthesis, and future prospects. *Nanomaterials.* 2024. Vol. 14 (22). P. 1805. https://doi.org/10.3390/nano14221805
2. Gómez-Urios C., Viñas-Ospino A., Puchades-Colera P., Blesa J., López-Malo D., Frígola A., Esteve M.J. Choline chloride-based natural deep eutectic solvents for the extraction and stability of phenolic compounds, ascorbic acid, and antioxidant capacity from *Citrus sinensis* peel. LWT – *Food Science and Technology.* 2023. Vol. 177. P. 114595. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114595
3. de Almeida Pontes P.V., Shiwaku I.A., Maximo G.J., Batista E.A.C. Choline chloride-based deep eutectic solvents as potential solvent for extraction of phenolic compounds from olive leaves: Extraction optimization and solvent characterization. *Food Chemistry*. 2021. Vol. 352. P. 129346. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.12934
4. Palos-Hernández A., Gutiérrez Fernández M.Y., Escuadra Burrieza J., Pérez-Iglesias J.L., González-Paramás A.M. Obtaining green extracts rich in phenolic compounds from underexploited food by-products using natural deep eutectic solvents: Opportunities and challenges. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2022. Vol. 29. P. 100773. https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100773
5. Antunes Filho S., Dos Santos M.S., Dos Santos O.A.L., Backx B.P., Soran M.L., Opriş O., Lung I., Stegarescu A., Bououdina M. Biosynthesis of nanoparticles using plant extracts and essential oils. *Molecules*. 2023. Vol. 28 (7). P. 3060. https://doi.org/10.3390/molecules28073060
6. Santhosh P.B., Genova J., Chamati H. Green synthesis of gold nanoparticles: An eco-friendly approach. *Chemistry*. 2022. Vol. 4 (2). P. 345–369. https://doi.org/10.3390/chemistry4020026
7. Długosz O., Matyjasik W., Matysik J., Banach M. Anhydrous metal nanoparticle suspensions using deep eutectic solvents (DES) – green approach to metal nanoparticles production. *Journal of Molecular Liquids.* 2024. Vol. 396. 123966. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.123966
8. Datta S., Mahin J., Liberti E., Manasi I., Edler K.J., Torrente-Murciano L. Role of the deep eutectic solvent reline in the synthesis of gold nanoparticles. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering.* 2023. Vol. 11 (28). https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c07337
9. Ortega-Córdova R., Sánchez-Carillo K., Carrasco-Saavedra S., Ramírez-García G., Pérez-García M.G., Soltero-Martínez J.F.A., Mota-Morales J.D. Polyvinylpyrrolidone-mediated synthesis of ultra-stable gold nanoparticles in a nonaqueous choline chloride–urea deep eutectic solvent. *RSC Appl. Interfaces.* 2024. Vol. 1. P. 600–611.
10. Воробйова В.І., Андрух Ю.М., Морозова Д.О., Зємцова В.В., Васильєв Г.С., Скиба М.І., Скиба Ю.М. Добір складових для синтезу екологічних іонних рідин нового покоління на основі квантово-хімічних розрахунків. В*чені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2024. Том 35 (74), № 1. С. 78–84. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/1_2024/part_2/16.pdf
11. Zou F., Tan C., Zhang B., Wu W., Shang N. The valorization of banana by-products: Nutritional composition, bioactivities, applications, and future development. *Foods*. 2022. Vol. 11 (20). P. 3170. https://doi.org/10.3390/foods11203170
12. Chaudhry F., Ahmad M. L., Hayat Z., Ranjha M. M. A. N., Chaudhry K., Elboughdiri N., Asmari M., Uddin J. Extraction and evaluation of the antimicrobial activity of polyphenols from banana peels employing different extraction techniques. *Separations*. 2022. Vol. 9 (7). P. 165. https://doi.org/10.3390/separations9070165
13. Pena-Pereira F., Wojnowski W., Tobiszewski M. AGREE-Analytical GREEnness Metric Approach and Software. *Anal. Chem.* 2020. Vol. 92. P. 10076–10082. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01887

Skyba Yu.M., Skyba M.I., Kovalenko I.L. SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES USING EXTRACTS OBTAINED IN DEEP EUTETIC SOLVENT ENVIRONMENTS

The article studies the effectiveness of using extracts obtained in deep eutectic solvents (DES) based on choline chloride for the synthesis of stable dispersions of gold nanoparticles. DES s based on choline chloride were used as a new alternative to traditional solvents for ultrasonic extraction of substances from plant materials, in particular, on the example of banana peel (Musaceae). The method of theoretical calculations using the Analytical GREEnness calculator was used to compare extraction using DES s and traditional extraction with ethanol/water. Gold nanoparticles were synthesized by reducing an aqueous solution of hydrogen tetrachloroaurate (III) hydrate ($HAuCl_4 \cdot 3H_2O$) using the obtained DES extracts of three types: choline chloride: xylitol, choline chloride: proline, choline chloride: urea. It was found that the content of extracted flavonoids, using the studied DES compositions based on choline chloride, is 70–460 mg EC/100 g and depends on the DES composition. The determined value of the antioxidant activity of the obtained extracts was by the DPPH method ((2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)) was DES -1 (50 mgEAA/100 g) > DES -2 (300–340 mgEAA/100 g) > DES -3 (450–460 mgEAA/100 g). It was found that banana peel extracts obtained in the studied DES media allow the synthesis of spherical gold nanoparticles (Au NPs). The obtained nanoparticles are characterized by a maximum peak of plasmon resonance absorption approximately at λ =550–565 nm with A = 0.2–0.5 ud. units. to 1.8–2.0 with an increase in the initial concentration of gold ions from 0.3 mmol/l to 3.0 mmol/l. It was established that the technologically appropriate synthesis parameters are: the ratio of the precursor solution to the DES extract 1:10 (vol/vol), τ = 30–60 min at a temperature of 50–60 °C. By the method of dynamic light scattering, it was established that the average size range of nanoparticles is 50–61 nm. It was established that the dispersions obtained in the DES medium are stable to aggregation, as evidenced by the value of the zeta potential ζ= –33 ÷ –36 mV.

Key words: *metal nanoparticles, characteristics, optical properties, stability, synthesis, deep eutectic solvents, extracts.*

УДК 661.566
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/36

Столяренко Г.С.
Черкаський державний технологічний університет

СИНТЕЗ ТА ВИКОРИСТАННЯ КИСНЕВМІСНИХ РАДИКАЛІВ ПІД ВПЛИВОМ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФІОЛЕТУ У ВИРОБНИЦТВІ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

У статті розглянуто теоретичні основи процесу фотокаталітичного перетворення води і кисню повітря в активні сполуки у вигляді оксигеновмісних радикалів, що дають можливість при взаємодії з оксидами Нітрогену синтезувати низьконцентровані розчини нітратної кислоти.

Для виробництва нітратної кислоти використовують методи каталітичного термічного відновлення оксидів Нітрогену, які під дією відновників переходять в молекулярний азот, а як побічні продукти відводиться вода і CO_2. Неселективне відновлення здійснюється шляхом гетерофазної взаємодії оксидів Нітрогену з дозованою кількістю відновника (водень, метан, Карбон (II) оксид, азотно-воднева суміш чи нафтовий газ). Як каталізатори використовуються: платина, родій, паладій, нікель, хром та інші.

Метод селективного каталітичного відновлення оксидів Нітрогену до молекулярного азоту заснований на використанні як відновника – аміаку. Проблемами процесу є: можливість вторинного забруднення димових газів аміаком; утворення відкладень амоній сульфіт-бісульфіту, що призводить до зупинки димососа і повітронагрівача. Негативним чинником, властивим всім каталітичним відновним процесам, є висока витрата відновника для взаємного руйнування зв'язаного азоту.

Пропонується використання мокрих способів очищення, що ґрунтуються на ряді хемосорбційних процесів, де, як абсорбенти використовуються: вода з різними окисниками, розчини карбонатів, гідрокарбонатів та карбаміду. Реакції оксидів Нітрогену з розчинами окисників характеризуються високим ступенем очищення, але дороговартісні на стадії підготовки окисника і переробки продуктів реакцій.

Потрібні більш досконалі розробки, як по каталітичних масах, так і по системах очищення. Запропоновано механізм отримання оксигеновмісних радикалів з води і кисню повітря та елементарні реакції синтезу нітратної кислоти. Наведено методику проведення дослідження, принцип роботи експериментальної установки з використанням двох гідрогенних ламп. Одна з ламп є джерелом ультрафіолетового опромінення, а друга – реактором проведення дослідження процесу окиснення та поглинання NO. Наведено класифікацію категорій ультрафіолетового опромінення залежно від діапазону довжини хвиль, що дало можливість обрати оптимальні умови проведення процесу і обрати склад кварцового скла (LiF) для проведення експериментів. Представлено методику визначення оксидів Нітрогену з використанням реактиву Грісса. Наведено результати експериментальних досліджень при різних умовах кислотоутворення (HNO_3). Всі розрахунки здійснювалися за допомогою програми MathCad.

Отримані результати експериментальних даних було використано при розробці конструкції реактора ультрафіолетового опромінення: матеріалу для використання кварцового скла (LiF); розмірів реакційного об'єму; часу знаходження газової суміші в реакційному об'ємі реактора.

Ключові слова: *радикал, ультрафіолет, спектр, оксиди Нітрогену, технології виробництва нітратної кислоти.*

Постановка проблеми. Існуючі у промисловості технології очищення нітрозних газів започатковані на процесах відновлення оксидів Нітрогену на каталізаторах. У промисловій практиці застосовують методи каталітичного відновлення оксидів Нітрогену природним газом або аміаком до молекулярного азоту та води. Умовно за температурою відновлення процеси поділяють на високотемпературні (більше 500 ºС) та низькотемпературні (менше 500 ºС) [1].

З метою зменшення витрат природного газу та зниження температури процесу в наш час найбільш поширений метод низькотемпературного відновлення, що ґрунтується на селективній взаємодії оксидів Нітрогену з аміаком на алюміно-ванадієвому каталізаторі. Технологія очищення

нітрозних газів від оксидів Нітрогену складна та дороговартісна, але ще й призводить до витрат зв'язаного азоту для процесів утилізації нітрозних газів з отриманням молекулярного азоту. При використанні аміаку викидні нітрозні гази забруднюються надлишковим азотом.

В даній статті пропонується технологія очищення нітрозних газів шляхом їх окиснення під дією вакуумного ультрафіолету та поглинання у присутності кисню повітря та активованій вакуумним ультрафіолетом води для перетворення оксидів Нітрогену у розбавлену нітратну кислоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючий перелік останніх досліджень та публікацій щодо очищення нітрозних газів складає більше 100 джерел, що підтверджує актуальність даного напряму досліджень. Запропоновано різноманітні сорбенти та окисники для зменшення викидів оксидів Нітрогену в атмосферу. Як окисники використовувалися розчини калій перманганату, перекису водню та озону. Радикальні процеси, що використовують $HO^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$ використовують як в методах газофазного [2, с. 1–3] так і гетерофазного озонування [3, с. 142–145; 4, с. 5–8].

Процеси, що пропонуються, спрямовані на заміну існуючих у виробництві економічно недоцільні відновлювальні методи, що призводять до втрат зв'язаного азоту NH_3 для зменшення викидів оксидів Нітрогену в навколишнє середовище.

Постановка завдання. Ультрафіолетове опромінення при синтезі нітратної кислоти здійснюється з використанням оксидів Нітрогену низької концентрації. З метою визначення оптимальних умов випливу ультрафіолетового опромінення використовуються оксигеновмісні радикали, що синтезуються з молекул води та кисню нітрозного газу.

Досліджувався вплив ультрафіолетового опромінення на процес окиснення оксидів Нітрогену оксигеновмісними радикалами під впливом активованих молекул води у присутності кисню повітря. Для цього було проведено серію дослідів синтезу нітратної кислоти.

Виклад основного матеріалу. Світло за спектром (довжиною хвилі) розділяється на категорії [5, с. 394], а саме на ультрафіолетове, видиме та інфрачервоне. В свою чергу ультрафіолетові (УФ) промені також поділяються за довжиною хвилі на підкатегорії, це розділення надано у таблиці 1.

При потраплянні УФ випромінення в систему кисень-вода (O_2-H_2O) відбувається синтез оксигеновмісних радикалів ($HO^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$) [5].

Процес залежить від порогової довжини хвиль з утворенням атомарного Оксигену $O(^3P)$, $O(^1D)$ і $O(^1S)$ [6, с. 8] з кисню потоку нітрозного газу верху абсорбційної колони:

$$O_2 \xrightarrow{h\nu} O(^3P) + O(^1D) \; < 1750 \text{ Å} \qquad (1)$$

$$O_2 \xrightarrow{h\nu} O(^3P) + O(^3P) \; < 2424 \text{ Å} \qquad (2)$$

$$O_2 \xrightarrow{h\nu} O(^3P) + O(^1S) \; < 1332 \text{ Å} \qquad (3)$$

Процес утворення радикалів з води проходить в області 1400–1900 Å – $\bar{X}^1A_1$, кут між зв'язками H-O-H дорівнює 105,2°; енергія зв'язку D_o(H-O-H) дорівнює 5,118±0,01 еВ ($O(^3P) + H_2O \rightarrow HO^{\bullet} + HO^{\bullet}$.

При опроміненні води ультрафіолетовими променями з довжиною хвилі 1400–1900 Å, основним переважаючим процесом у цій області є утворення $H^{\bullet}$ і $^{\bullet}OH(X^2\Pi)$ [5]:

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} H^{\bullet} + {}^{\bullet}OH(X^2\Pi) < 2420 \text{ Å} \qquad (4)$$

Обертальне розподілення $HO^{\bullet}$ практично спостерігається при кімнатній температурі.

Таблиця 1

Поділ УФ світла на підкатегорії

Спектральна підкатегорія	Діапазон довжин хвиль (нм)	Назва
UV	$100 \le \lambda < 400$	Ультрафіолет
VUV	$10 \le \lambda < 200$	Вакуумний ультрафіолет
EUV	$10 \le \lambda < 121$	Екстремальний ультрафіолет
H Lyman-α	$121 \le \lambda < 122$	Водневий Леман-альфа
FUV	$122 \le \lambda < 200$	Далекий ультрафіолет
UVC	$100 \le \lambda < 280$	Ультрафіолет С
MUV	$200 \le \lambda < 300$	Середній ультрафіолет
UVB	$280 \le \lambda < 315$	Ультрафіолет В
NUV	$300 \le \lambda < 400$	Ближній ультрафіолет
UVA	$315 \le \lambda < 400$	Ультрафіолет А

Вважається, що збуджений стан води, відповідальний за дисоціацію у цій області – нестабільний стан $\tilde{A}(^1B_1)$.

Другий енергетично можливий по спіну первинний процес:

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} H_2 + O^1(D) < 1770\ Å \qquad (5)$$

При імпульсному фотолізі суміші води з великим надлишком H_2 отримали більші концентрації $HO^{\bullet}$, ніж при фотолізі чистої води. Утворення надлишку H_2 віднесли до процесу (6) за наступною реакцією:

$$O^1(D) + H_2 \rightarrow {}^{\bullet}OH + H^{\bullet} \qquad (6)$$

В області 1200–1400 Å основними переважаючими процесами є процеси (5), (6). При довжині хвилі менше 1350 Å наступний процес (7) складає 5 % від загального [7, с. 63]:

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} H^{\bullet} + {}^{\bullet}OH(A^2\Sigma+) < 1357\ Å \qquad (7)$$

Енергія, яка перевищує мінімальне значення, необхідна для проходження реакції (7), йде переважно на обертаюче збудження ${}^{\bullet}OH(A^2\Sigma+)$.

Радикали $HO^{\bullet}\cdot$ і $HO_2^{\bullet}\cdot$ утворюються також з високим квантовим виходом при розкладанні води в умовах вакуумного ультрафіолету при довжині хвилі $\lambda < 1470$ А:

$$H_2O \rightarrow H^{\bullet}\cdot + HO,^{\bullet} \qquad (8)$$

$$H\bullet\cdot + O2 \xrightarrow{h\nu} HO_2^{\bullet} \qquad (9)$$

Коливально-збуджені радикали $HO^{\bullet}\cdot$ і $HO_2^{\bullet}\cdot$ при будь-яких концентраціях практично миттєво (10^{-2} – 10^{-4} с) вступають в реакцію з Нітроген (II) оксид, незважаючи на мікроконцентрації останнього [8, с. 141]:

$$HO^{\bullet} + NO \xrightarrow{M} HNO_2^{\bullet},$$
$$(k_6 = 1{,}8 \cdot 10^9\ л \cdot моль^{-1} \cdot с^{-1}), \qquad (10)$$

$$HO_2^{\bullet} + NO \xrightarrow{M} HNO_3^{\bullet},$$
$$(k_7 = 7{,}8 \cdot 10^8\ л \cdot моль^{-1} \cdot с^{-1}), \qquad (11)$$

$$HO^{\bullet} + HNO_2^{\bullet} \rightarrow H_2O + NO_2,$$
$$(k_8 = 3{,}6 \cdot 10^9\ л \cdot моль^{-1} \cdot с^{-1}), \qquad (12)$$

$$NO_2 + HO^{\bullet} \rightarrow HNO_3$$
$$(k_9 = 1{,}8 \cdot 10^9\ л \cdot моль^{-1} \cdot с^{-1}) \qquad (13)$$

Швидкість наведених реакцій, а також їх повнота, дозволяє шляхом визначення кількості утвореної нітратної та нітритної кислот оцінити кількість утворених оксигеновмісних радикалів ($HO^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$). Це твердження і було покладене в основу дослідження процесу утворення оксигеновмісних радикалів ($HO^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$) при використанні вакуумного ультрафіолету та нітратної кислоти.

Методика проведення досліджень. Принцип роботи експериментальної установки.

В процесі досліджень радикали синтезувалися в потоці газової суміші з концентрацією NO і NO_2 відповідно 0,1 і 0,002 % об. Ця газова суміш направлялася в реакційну зону, що піддавалася впливу вакуумного ультрафіолетового опромінювання.

Довжини хвиль вакуумного ультрафіолету для фотохімічної обробки отримували при використанні водневої лампи 7 і вікон з фториду літію. Моделювання складу газу здійснювалося на базі стандартизованих сумішей. Час перебування газу в зоні опромінення змінювався за рахунок зміни витрати газу від 0,25 до 0,45 с. Зона опромінення – реактор 4 –це друга воднева лампа з вікном з скла з літій фториду.

Дослідження проводилися на лабораторній експериментальній установці (рис. 1).

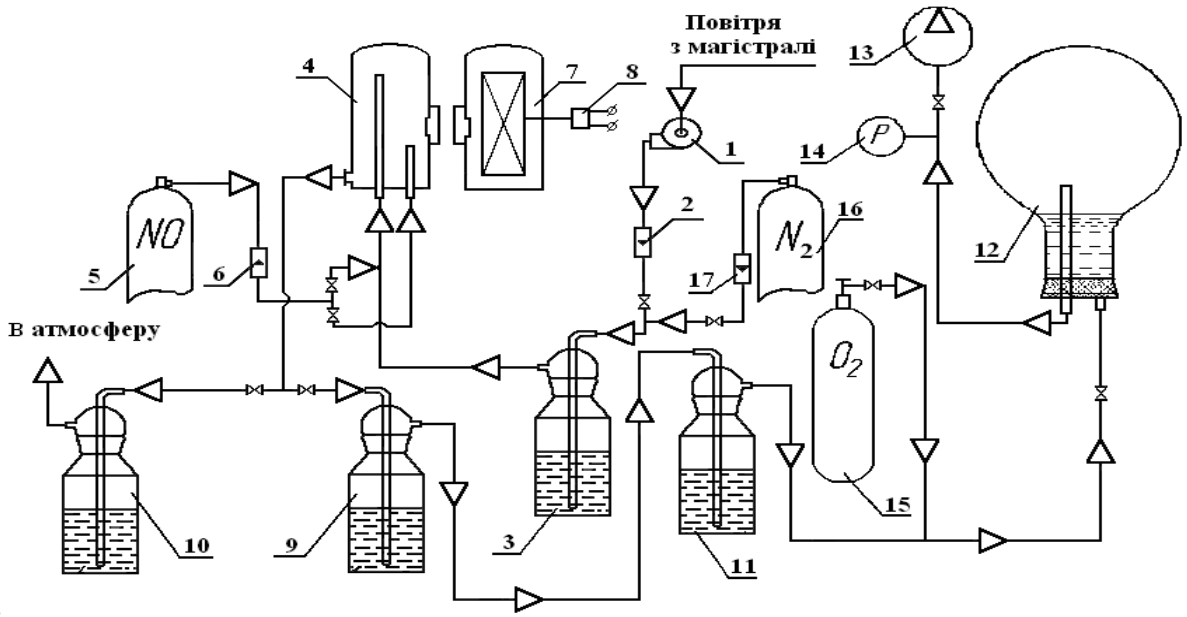
Газовий потік з балону 5 з монооксидом азоту через витратомір 6 подається в реактор 4 звідкіля повітряний потік скидається через санітарну склянку 10 в атмосферу. З метою проведення аналізу газ відбирається у поглинальні склянки 9 та 11 з 8-ми % KI, де відбувається поглинання NO_2. Недоокиснений NO потрапляє в евакуйовану колбу 12. Сюди ж для його доокиснення додається кисень з балону 15, і отриманий NO_2 поглинається 8 % розчином KI. Вміст NO та NO_2 визначаються калориметричним методом в присутності реактиву Грісса.

Було проведено і розраховано результати досліджень для витрат газу та умов проведення експерименту за допомогою програми MathCad.

Проведено серію дослідів, де Нітроген (II) оксид потрапляв в зону опромінення разом з парою води і киснем та досліди, де Нітроген (II) оксид уникав опромінення за рахунок удосконалення реактору. Результати досліджень з безпосереднім опроміненням Нітроген (II) оксиду (табл. 2).

За даними таблиці 3 побудовано графік залежності ступеня вилучення Нітроген (II) оксиду від часу перебування в зоні опромінення.

Ряд дослідів з визначення ступеня окиснення Нітроген (II) оксиду при фотоактивації ультрафіолетовим опроміненням було проведено для



1 – компресор; 2, 6, 17 – витратоміри; 3 – поглинальна склянка з водою; 4 – реактор для обробки ультрафіолетом; 5 – балон з монооксидом азоту; 7 – ультрафіолетова лампа; 8 – джерело постійного струму; 9 – поглинальна склянка; 10 – санітарна склянка з H_2O_2; 11 – склянка Дрекселя з 8-ми % KI; 12 – евакуйована колба; 13 – вакуум-насос; 14 – манометр; 15 – балон з киснем; 16 – балон з азотом.

Рис. 1. Схема лабораторної експериментальної установки

Таблиця 2

Результати фотоактивації Нітроген (II) оксиду з використанням пари води

Витрати N_2, $см^3$/хв	Витрати NO, $см^3$/хв	Час переб. в зоні опромінення, с	Без використання УФ			З використанням УФ			Ступінь Вилучення NO_X, α, %
			C_{NO_2}, $мг/м^3$	C_{NO}, $мг/м^3$	$\sum_{NO_X}$	C_{NO_2}, $мг/м^3$	C_{NO}, $мг/м^3$	$\sum_{NO_X}$	
2150	550	0,25	0,214	4,275	6,76	0	2,696	4,13	38,91
			0,38	5,96	9,52	0,08	3,61	5,62	40,96
			0,555	7,059	11,39	0	4,29	6,57	42,32
1710	550	0,29	0,35	5,03	5,38	0,57	1,96	2,54	52,78
1710	550	0,29	0,36	4,62	7,45	0,38	3,53	3,91	47,52
			0,38	6,61	10,52	0,19	3,28	5,23	50,28
1488	550	0,33	0,23	6,50	10,20	0,53	3,50	5,90	42,15
			0,34	5,36	8,56	0,39	3,06	5,09	40,54
			0,49	3,72	6,20	0,15	2,38	3,80	38,70
1290	550	0,37	0,79	8,65	14,06	0,49	6,35	10,23	27,24
			0,31	9,35	14,65	0,42	6,54	10,45	28,66
			0,24	9,87	15,38	0,32	7,26	11,45	25,55

газової суміші з парою води при суміжному потраплянні NO в зону опромінення (табл. 3).

На основі отриманих даних побудовано графік залежності ступеня вилучення Нітроген (II) оксиду від часу контактування суміші в зоні опромінення.

З метою визначення енергетичних витрат впливу ультрафіолетового опромінення на окиснення Нітроген (II) оксиду оксигеновмісними радикалами було проведено ряд дослідів, при не потраплянні NO в зону багатократного опромінення (табл. 4).

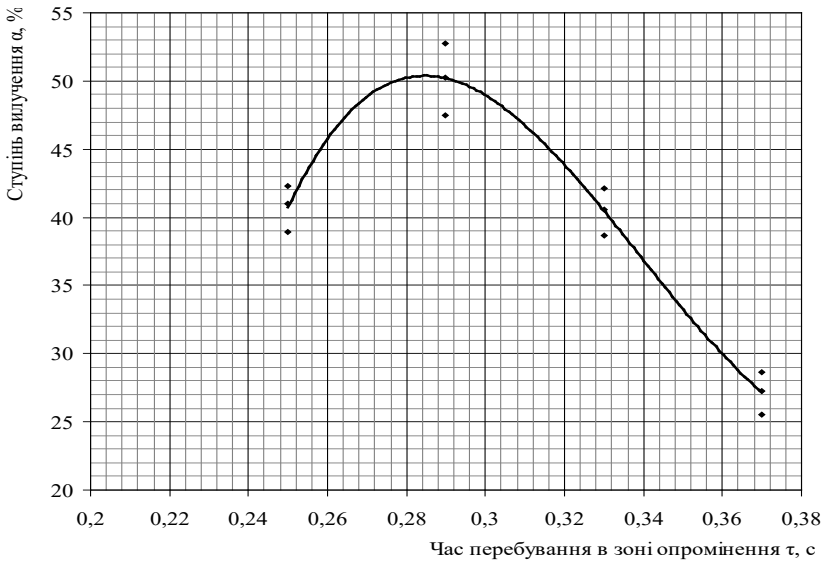
Порівнюючи дані ступеня вилучення різних сумішей з NO_x в таблиці 4 можна зробити висновок, що паро-повітряна суміш найбільш позитивно впливає на окиснення Нітроген (II) оксиду.

З рисунку 3 видно, що зі зменшенням часу перебування в зоні опромінення повітря

Таблиця 3

Результати фотоактивації Нітроген (II) оксиду з паро-повітряною сумішшю

Витрати повітря, $см^3/хв$	Витрати NO, $см^3/хв$	Час переб. в зоні опромінення, с	Без використання УФ			З використанням УФ			Ступінь вилучення NO_x, α, %
			C_{NO_2}, $мг/м^3$	C_{NO}, $мг/м^3$	$\sum_{NO_X}$	C_{NO_2}, $мг/м^3$	C_{NO}, $мг/м^3$	$\sum_{NO_X}$	
650	575	0,29	48,30	96,86	196,86	30,34	35,56	84,88	56,88
			32,66	80,93	156,79	17,06	39,66	77,89	50,32
			50,69	83,15	178,23	28,47	35,64	83,13	53,35
890	600	0,33	45,85	67,87	149,95	37,57	35,65	92,25	38,48
			57,88	57,26	145,70	41,37	33,13	92,18	36,73
			70,16	49,22	145,65	29,92	39,93	91,16	37,41
1330	645	0,47	95,88	216,83	428,44	78,99	178	352	17,84
			101,84	213,82	429,78	78,34	183,68	360,06	16,22
			107,80	210,80	431,11	73,04	190,36	365	15,33



$$y = -1425{,}841 + 13666{,}674 \cdot x - 41364{,}323 \cdot x^2 + 40651{,}042 \cdot x^3$$

Рис. 2. Залежність ступеня вилучення Нітроген(II) оксиду від часу перебування в зоні опромінення

Таблиця 4

Результати проведення експерименту при постійних затратах електроенергії 0,11774 кВт·год.

Суміш	Витрати, $см^3/хв$	Час переб. в зоні опромінення, с	Без УФ			З УФ			Ступінь вилучення, %
			NO_2	NO	∑ NOx	NO_2	NO	∑ NOx	
Азот + вода	890	0,756	0	33,446	33,446	0	15,069	15,069	52,95
	1710	0,29	0,35	42,851	43,201	1,429	15,351	16,780	61,16
	2150	0,25	0	26,149	26,149	0,986	1,512	2,498	90,45
Сухе повітря	650	0,55	7,82	111,196	119,016	14,1	48,972	63,072	47,01
	890	0,45	16,32	2,629	18,955	21,393	21,520	42,913	55,83
	1330	0,34	2,39	83,742	86,132	0,285	34,314	34,599	60,16
	1725	0,25	2,523	123,942	126,465	0,96	54,979	55,939	55,77
Паро-повітряна	650	0,55	37,47	178,548	215,965	39,689	133,72	173,407	19,71
	890	0,45	16,27	99,410	115,68	26,496	61,178	87,674	24,21
	1330	0,34	75,23	201,601	276,829	18,9	112,15	131,049	52,66
	1725	0,25	1,536	1,206	2,742	0,465	104,62	105,088	61,26

і пари води збільшується ступінь вилучення NO_x. Це пояснюється тим, що під дією квантів випромінювання, відбувається фотоліз молекули води з утворенням високореактивних гідроксильних радикалів і їх взаємодія з Нітроген (IV) оксидом.

Методика визначення оксидів Нітрогену.

При проведенні експерименту використовувалася методика, що дозволяє, як сумарно, так і окремо визначати концентрації NO та NO_2 в газах. Діапазон вимірювання (в перерахунку на NO_2) від 5 до 1000 мг/м^3. Похибка вимірювання даного методу ±18,3 %.

Метод фотоколориметричний, заснований на реакції взаємодії NO_2 з KI та отриманням KNO_2, який при дії на нього сульфаніловою кислотою, та α-нафтіламіном (реактив Грісса) утворює червоний азобарвник. У пробі міститься NO, який попередньо окиснюється до NO_2.

Оптичну густину вимірюють на фотоколориметрі при довжині хвилі (540 ± 10 нм).

$$2\,KI + 2NO_2 = I_2 + 2KNO_2. \qquad (14)$$

Дослідження процесу утворення оксигеновмісних радикалів ($HO^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$) проводилося для двох систем:

Сухий газ: NO –NO_2 –O_2–N_2;

Вологий газ: NO–NO_2–O_2–N_2–H_2O.

Час перебування газу в зоні опромінення змінювався за рахунок зміни витрати газу від 0,25 до 0,45 с. (табл. 5).

Вплив вакуумного ультрафіолету на утворення оксигеновмісних радикалів ($HO^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$) у вологому газі.

Час перебування газу в зоні опромінення змінювався за рахунок зміни витрати газу від 0,45 до 0,25 с. (табл. 6).

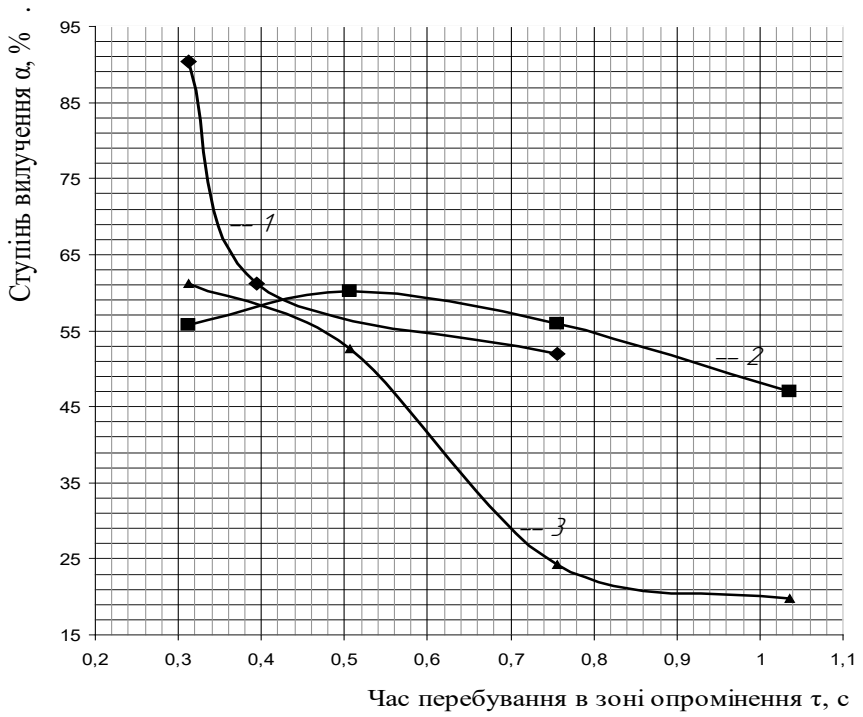


Рис. 3. Залежності ступеня вилучення NO_x від часу контактування реагентів в зоні опромінення

Таблиця 5

Фотоокиснення Нітроген (II) оксиду низьких концентрацій (0,08 % об. NO і 0,002 % об. NO_2) в системі NO-NO_2-O_2-N_2

Час контакту, с	Концентрація NO, 10^{-3}, мг/м^3	Концентрація NO_2, $\cdot10^{-3}$, мг/м^3	Ступінь окиснення без УФ,%	Ступінь окиснення з УФ,%
0,45	0,205	0,867	0,079	26,61
0,303	0,537	0,384	0,093	31,80
0,35	0,499	0,4682	0,107	37,93
0,3	0,4808	0,5134	0,121	41,05
0,25	0,478	0,5935	0,134	44,67

Таблиця 6

Фотоокиснення Нітроген (II) оксиду низьких концентрацій (0,08 % об. NO і 0,002 % об. NO_2) в системі $NO\text{-}NO_2\text{-}O_2\text{-}N_2\text{-}H_2O$

Час контакту, с	Концентрація NO, 10^{-3}, мг/м^3	Концентрація NO_2, $\cdot10^{-3}$, мг/м^3	Ступінь окиснення без УФ,%	Ступінь окиснення з УФ,%
0,45	0,864	0,2444	0,956	15,39
0,33	0,7526	0,4415	0,96	27,67
0,25	0,450	0,883	0,965	56,13
0,30	0,368	1,0124	0,97	64,19
0,25	0,0817	1,5504	0,978	72,52

Фотоокиснення вологого нітрозного газу дозволяє досягнути ступеня окиснення NO_x до 72,52 % (максимально до 90 % при оптимальному часі перебування газу в зоні опромінення). Подальше збільшення часу перебування газу в зоні контакту призводить до зниження ступеня окиснення, що пояснюється переважаючим впливом реакцій руйнування NO_2 до NO під дією вакуумного УФ.

Результати експериментів були основою для розробки реактора «світла тарілка» з багатополочним розміщенням УФ-ламп на верхній царзі абсорбційної колони виробництва розбавленої нітратної кислоти.

Висновки. 1. Отримані результати дозволяють запропонувати використання даного методу для технології очищення нітрозних газів шляхом їх окиснення під дією вакуумного УФ та поглинання для перетворення до нітратної кислоти. Високий вихід по реакціях (10) – (13) дає можливість до високого ступеня окиснення та практично повного перетворення NO_x в HNO_3.

2. Використання вакуумного УФ в процесах очищення, що містять газову суміш $NO\text{-}NO_2\text{-}O_2\text{-}N_2\text{-}H_2O$, можуть збільшити ступінь окиснення NO_x до 72,52 %.

Список літератури:

1. Технологія зв'язаного азоту. Підручник / Л. Л. Товажнянский, О. Я. Лобойко та ін; За ред. О. Я. Лобойка. Харків: НТУ «ХПІ», 2006. 536 с. http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4694.

2. Process for removing nitrogen oxides from gaseous mixtures. Pat. 4055624 USA, МКИ С 01 В 21/00 / Voshida Hiraguki, Saga Katumi; publ. 20.09.76.

3. Столяренко Г.С., Астрелін І.М. Гетерофазний озонний метод видалення оксиду азоту із димових газів. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2000 №1 (9).

4. Вязовик В.М., Громико А.В., Столяренко Г.С. Озонна технологія зниження токсичності відхідних газів. Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. 2001. № 4.

5. Hideo Okabe, Photochemistry of Small Molecules, John Wiley & Sons Inc, New York. 431 (1978).

6. Farmer A.I.D., Fabian W., Lewis B.R., Lohan K.H., Haddad G.N., J.Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 8. (1968).

7. Cottin M., Masanet J., Vermeil C., J. Chim. Phys. 63. (1966).

8. Столяренко Г.С. Озоно-радикальні процеси в технології денітрифікації газових потоків / Г.С. Столяренко: М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. у-т. Черкаси, Вертикаль, 2021–228 с., іл.

Stolyarenko H.S. SYNTHESIS AND USE OF OXYGEN RADICALS UNDER THE INFLUENCE OF VACUUM ULTRAVIOLET IN THE PRODUCTION OF NITRIC ACID

The article considers the theoretical foundations of the process of photocatalytic conversion of water and oxygen from the air into active compounds in the form of oxygen-containing radicals, which make it possible to synthesize low-concentrated solutions of nitric acid when interacting with Nitrogen oxides.

For the production of nitric acid, methods of catalytic thermal reduction of Nitrogen oxides are used, which, under the action of reducing agents, are converted into molecular nitrogen, and water and CO_2 are removed as by-products. Non-selective reduction is carried out by heterophase interaction of Nitrogen oxides with a metered amount of reducing agent (hydrogen, methane, Carbon (II) oxide, nitrogen-hydrogen mixture or petroleum gas). The following catalysts are used: platinum, rhodium, palladium, nickel, chromium and others.

The method of selective catalytic reduction of Nitrogen oxides to molecular nitrogen is based on the use of ammonia as a reducing agent. The problems of the process are: the possibility of secondary contamination of flue gases with ammonia; the formation of ammonium sulfite-bisulfite deposits, which leads to the shutdown of

the smoke exhauster and air heater. A negative factor inherent in all catalytic reduction processes is the high consumption of the reducing agent for the mutual destruction of bound nitrogen.

It is proposed to use wet cleaning methods based on a number of chemisorption processes, where the following are used as absorbents: water with various oxidants, solutions of carbonates, hydrocarbonates and urea. Reactions of Nitrogen oxides with solutions of oxidants are characterized by a high degree of purification, but are expensive at the stage of oxidant preparation and processing of reaction products.

More advanced developments are needed, both in terms of catalytic masses and in terms of cleaning systems. The mechanism of obtaining oxygen-containing radicals from water and atmospheric oxygen and elementary reactions of nitric acid synthesis are proposed. The research methodology is presented, the principle of operation of the experimental setup using two hydrogen lamps is presented. One of the lamps is a source of ultraviolet radiation, and the second is a reactor for studying the oxidation and absorption of NO. The classification of ultraviolet radiation categories depending on the wavelength range is presented, which made it possible to choose the optimal conditions for the process and choose the composition of quartz glass (LiF) for conducting experiments. The method of determining nitrogen oxides using Griess reagent is presented. The results of experimental studies under different conditions of acid formation (HNO_3) are presented. All calculations were carried out using the MathCad program.

The obtained experimental data results were used in the development of the design of the ultraviolet irradiation reactor: the material for using quartz glass (LiF); the dimensions of the reaction volume; the residence time of the gas mixture in the reaction volume of the reactor.

Key words: *radical, ultraviolet, spectrum, Nitrogen oxides, nitric acid production technologies.*

УДК 615.478:615.83(045)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/37

Трофімов І.Л.
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Матвєєва О.Л.
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Чумак В.Л.
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Єфименко В.В.
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Левченко С.В.
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВОДНЕВО-КИСНЕВО-ОЗОНОВОЇ ТЕРАПІЇ

У статті наведено аналіз наукової літератури щодо впливу озону, кисню та молекулярного водню, залежно від шляхів введення, на різні рівні організації організму при різних патологічних станах, а також обговорюються можливі напрями їх спільного застосування у медицині. Встановлено, що використання системної озонотерапії ефективне в лікуванні широкого спектру захворювань, зокрема таких захворювань, як атеросклероз, наслідки ішемічного інсульту, вегето-судинна дистонія, мігрень та цукровий діабет, можуть бути успішно контрольовані безболісно та без побічних ефектів завдяки озону. Киснева терапія зазвичай призначається при респіраторних та серцевих захворюваннях, ефективно усуває симптоми дихальної недостатності та має позитивний вплив на серцево-судинну систему. Воднева терапія дає позитивний антиапоптозний, протиалергічний ефекти, а також стимулює енергетичний метаболізм. При цьому побічні ефекти вкрай незначні навіть при введенні в організм високих концентраціях водню, що дозволяє говорити про безпеку і відсутності протипоказань до застосування водневої терапії. Запропоновано власне розроблену корисну модель приладу для воднево-киснево-озонової терапії, яка належить до хімічних технологій лікарських речовин та медичних виробів, а саме до медичного обладнання для проведення воднево-киснево-озонової інгаляції і може бути використана в медицині та клінічній практиці під час лікування цілого ряду захворювань із застосуванням кисню, водню та озону. Запропонований прилад дозволяє значно розширити його функціональні можливості щодо використання в різних методиках лікування за допомогою воднево-киснево-озонової терапії. Прилад дозволяє проводити насичення воднем фізіологічних розчинів, що знаходяться у герметичних стерильних пластикових пакетах, насичувати водні розчини воднем, використовувати воднево-киснево-озонову суміш для проточного зрошення, використання озонованої чи збагаченої воднем води або олії в бапьнеозонотерапії. Прогнозовано прилад можна використовувати в комплексному лікуванні та профілактиці багатьох захворювань.

Ключові слова: *медичне обладнання, лікування, молекулярний водень, воднева терапія, киснева терапія, озонова терапія, інгаляція, корисна модель.*

Постановка проблеми. Окиснювальний стрес відіграє ключову роль у патогенезі широкого спектру захворювань, включаючи серцево-судинні, нейродегенеративні захворювання, рак та цукровий діабет. Незважаючи на значну кількість антиоксидантних засобів, ефективність їх клінічного використання залишається обмеженою. Молекулярний водень – малий нейтральний газ, здатний проникати через біологічні мембрани і вибірково нейтралізує найбільш токсичні вільні радикали – є інноваційним напрямком профілактики та лікування захворювань, пов'язаних з окисним стресом.

Як відомо, озонотерапія – метод лікування із застосуванням озону, отриманого за допомогою медичного озонатора з кисню у терапевтичних концентраціях [1]. Застосування медичного озону (озоно-кисневої суміші, що складає

з 0,05% – 10% озону і 99,95% – 90% чистого кисню) є особливо ефективним при судинних захворюваннях з вираженою гіпоксією: стенокардії, атеросклерозі, вадах серця, ішемічній хворобі. Озон активізує обмінні процеси на клітинному рівні, поліпшує мікроциркуляцію крові і газообмін. Озон успішно використовується в хірургії для лікування гнійних ран, трофічних виразок, перитоніту, сепсису тощо. Необхідно відзначити, що регулярні курси озонотерапії істотно поліпшують стан хворих на діабет, рак, СНІД й дозволяють їм вести нормальний спосіб життя. Озонотерапія з успіхом заміняє антибіотики при лікуванні запальних процесів та інфекцій різної етіології [1]. Озонотерапія передбачає використання озону (O_3) у медичних цілях. Деякі клініки, зокрема в Україні, застосовують цей метод для лікування різноманітних захворювань, включаючи серцево-судинні, ендокринні та шлунково-кишкові розлади. Озон має протизапальні, антисептичні та імуномодулюючі властивості. Проте варто зазначити, що озонотерапія залишається суперечливою в медичній спільноті. Деякі дослідження вказують на потенційні ризики, особливо при неправильному застосуванні, включаючи токсичність при інгаляції та можливі побічні ефекти [2].

У 2007 році завдяки дослідженням японських вчених Ікуроха Осави, Шігео Охти та ін. (Ikuroh Ohsawa, Shigeo Ohta et al) [3] дана концепція водневої терапії була переглянута і доведено, що молекулярний водень (H_2) вибірково реагує з високореактивними цитотоксичними оксидантами, такими як гідроксильний радикал (• OH) і пероксинітрит (ONOO-), безпосередньо всередині клітин. Саме ці найбільш реакційно здатні активні форми кисню беруть участь в патогенезі більшості відомих захворювань і патологічних станів різних органів і систем організму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні озон вважається популярним і ефективним засобом знезараження води, повітря та очищення продуктів харчування. Озон пригнічує вірус, частково руйнуючи його оболонку. Припиняється процес його розмноження і порушується здатність вірусів з'єднуватися з клітинами організму. При впливі озону на мікроорганізми, в тому числі на дріжджі, локально пошкоджується їх клітинна мембрана, що призводить до їх загибелі або неможливості розмножуватися. В праці [2] встановлено, що газоподібний озон вбиває практично всі види бактерій, вірусів, пліснявих і дріжджоподібних грибів і найпростіших. Озон в концентраціях від 1 до 5 мг/л протягом 4–20 хв. призводить до загибелі 99,9% ешерихії коли, стрептококів, мукобактерій, філококків, кишкової і синьогнійної паличок, протея, клебсієли і ін. Насичена озоном суміш буквально спалює бактерії і грибки і чудово зупиняє кров. Її застосовують при обробці сильно інфікованих ран, а також при пролежнях, гангрені, опіках. Низькі концентрації діють подібно життєдайного бальзаму – сприяють загоєнню і утворенню нових клітин шкіри.

Окрім руйнування бактерій, озон виконує й інші важливі функції. У невеликих дозах він впливає на локальний імунітет людини шляхом активації лейкоцитів для виявлення та нейтралізації патогенних мікроорганізмів. Озонотерапія сприяє поліпшенню насичення тканин киснем. Взаємодіючи з кров'ю, активний озон стимулює еритроцити до вироблення специфічного ферменту, який зміцнює зв'язок між гемоглобіном і киснем. Завдяки цьому ферменту, гемоглобін ефективніше постачає кисень до навколишніх тканин, що поліпшує їх функціонування. Перехід від низького до значнішого кисневого забезпечення сприяє зміцненню та оновленню капілярів. Це вдосконалює кровопостачання, стимулюючи процеси регенерації та загоєння тканин.

Концентрація 50-і частинок озону на 1,000,000,000 частинок повітря значно знижує забруднення повітря. Особливо сильний вплив виявляється на ешерихіями коли, сальмонелу, стафілокок, кандиду, аспергілліус. Озон благотворно впливає на здоров'я людей. У гірському повітрі міститься велика кількість озону. Саме там зустрічається найбільша кількість довгожителів. Ефект, одержуваний при озонотерапії, характеризується [2, 5]:

- активізацією процесів детоксикації, відбувається придушення активності зовнішніх і внутрішніх токсинів;
- активізацією процесів метаболізму (обмінних процесів);
- посиленням мікроциркуляції (кровопостачання);
- поліпшенням реологічних властивостей крові (кров стає рухомий);
- поліпшенням тканинного дихання;
- нормалізацією імунітету;
- нормалізацією процесу перекисного окиснення ліпідів (жирові обмінні процеси);
- активізацією антиоксидантного захисту організму (відновлюється динамічна рівновага між перекисне окислення та антиоксидантної захистом);

- зняттям запального процесу;
- має чітко виражений знеболюючий ефект.

Цілі використання озону в медичній практиці [5]:

- Обробка інфікованих ран, опіків, грибкових уражень шкіри, пролежнів.
- Використання озону як кровоспинний засіб (при високих концентраціях).
- Як загоювального за низьких концентрацій.
- В медицині використовують у вигляді газової суміші, розчиняється у фізіологічному розчині або дистильованої води, для лікування захворювань кишкового тракту, в хірургії та ін.
- Використовується також системна озонотерапія шляхом введення озону внутрішньом'язово, внутрішньовенно та ін.

Озонотерапія успішно застосовується практично у всіх областях медицини:

- відновлення мікрофлори кишечника;
- відновлення моторної функції кишечника;
- лікування серцево-судинних захворювань, артритів, артрозів;
- лікування інфекційних захворювань, в тому числі герпесу, гепатитів;
- радіаційні ураження;
- гангрена;
- шкірні захворювання та ін.

Застосування озону зовнішньо значно відрізняється за своїми наслідками від системної терапії. Такий метод називається парентеральною озонотерапією. У цій техніці озон розчиняється в фізіологічному розчині, дистильованій воді або в крові пацієнта і вводиться в організм через крапельне введення, ін'єкції чи підшкірні уколи. Використання системної озонотерапії ефективне в лікуванні широкого спектру захворювань. Такі хвороби, як атеросклероз, наслідки ішемічного інсульту, вегето-судинна дистонія, мігрень та цукровий діабет, можуть бути успішно контрольовані безболісно та без побічних ефектів завдяки озону. З кожним роком цей перелік хвороб продовжує розширюватися. Озон функціонує як антиоксидант і імуномодулятор. В основі багатьох патологій лежать окислювальні реакції та пов'язані з ними вільні радикали. Окиснення можна фактично назвати синонімом старіння. Хімічні реакції з участю кисню продукують вільні радикали через виділення атомів водню з клітин. Деякі з цих радикалів корисні, оскільки допомагають у боротьбі з інфекціями. Однак інші здатні атакувати клітини, викликаючи їх дисфункцію або загибель. До 50 років до 30% клітинних білків може бути зруйновано через активність вільних радикалів. Молекули озону, що складаються з трьох атомів кисню, можуть зв'язувати руйнівний водень і сприяти його виведенню з організму, тим самим продовжуючи життєздатність і молодість клітин.

Киснева терапія – це універсальний та ефективний метод лікування за допомогою кисню [6]. Ця терапія використовується для запобігання захворюванням і надання швидкої медичної допомоги. Введення медичного кисню ефективно задовольняє потреби організму, покращуючи функцію дихальної системи та інших органів. Гіпоксія – це патологічний стан, що виникає при недостатньому рівні кисню в організмі, що може призвести до дисфункції всіх органів. Вона також може зустрічатися у здорових людей, які ведуть малорухливий спосіб життя і рідко виходять на свіже повітря. Недостатність кисню може стати причиною депресії, метаболічних порушень, зниження імунітету й навіть виснаження організму. У таких випадках на допомогу приходить киснева терапія. Важливо, щоб концентрацію кисню і кількість сеансів кисневої терапії визначав лише лікар після консультації. У призначенні враховується причина патології та загальний стан здоров'я пацієнта.

Симптоми за яких лікарі радять кисневу терапію [6]:

- виникнення сонливості й загальмованість;
- мігрень та значне зниження пам'яті;
- порушення концентрації уваги та зниження фізичної активності;
- затяжна депресія та розлади сну;
- задишка та тривалий кашель;
- порушення серцевого ритму та нестійкий артеріальний тиск;
- запаморочення, швидка втома, порушення терморегуляції;
- набряки та блідість шкірних покривів.

Киснева терапія найчастіше показана при дихальних та серцевих розладах. Киснева терапія зазвичай призначається при респіраторних та серцевих захворюваннях. Медичні заклади повинні бути обладнані кисневими балонами. У деяких випадках може виникнути потреба в проведенні кисневої терапії вдома, але обов'язково слід попередньо проконсультуватися з лікарем. Достатнє забезпечення організму киснем дозволяє уникнути гіпоксії. Згодом метаболічні процеси приходять в норму, організм очищається від токсинів і шлаків. Імунітет зміцнюється, прискорюються всі відновлювальні процеси. Киснева терапія ефективно усуває симптоми дихальної

недостатності та має позитивний вплив на серцево-судинну систему. Покращене кровообіг призводить до нормалізації артеріального тиску.

Нещодавно молекулярний водень (H_2) здобув важливе місце в сфері медичної газотерапії завдяки своїм унікальним властивостям [7]. Цей газ, який не має кольору або запаху, є продуктом найпростішого хімічного елемента. Завдяки своїм невеликим розмірам і низькій молекулярній масі, H_2 здатен проникати через будь-які біологічні бар'єри. Багато добавок і антиоксидантів потребують специфічних транспортерів для потрапляння у клітини та досягнення ефективності, тоді як H_2 не вимагає цього через свої менші молекулярні параметри. Висока біодоступність H_2 відповідає основній вимозі будь-якого фармакологічного агента для реалізації біологічної дії. Проте для пояснення широти його біомодулюючих та лікувальних властивостей потрібні додаткові характеристики [8–10].

Наукова інформація в сфері біомедицини щодо H_2 активно оновлюється. На кінець 2022 року було проведено близько 100 рандомізованих контрольованих досліджень і опубліковано більше 2000 статей. Розглядаються численні аспекти впливу молекулярного водню, проте основна увага досліджень зосереджена на кардіологічних [9, 11], неврологічних [11–12] та радіопротекторних [13–14] ефектах водню. У працях [15–17] описано ефективне застосування водню про онкологічних захворюваннях.

Водневу терапію нещодавно додали до протоколів лікування пацієнтів з COVID-19 у Китаї. Згідно з китайськими клінічними рекомендаціями сьомого видання щодо діагностики та лікування пневмонії COVID-19, виданими Національною комісією охорони здоров'я Китаю, дослідження показали значну ефективність вдихання суміші з 66,6% водню та 33,3% кисню. Це значно уповільнює погіршення дихальної функції легень при новій коронавірусній інфекції, а також зменшує розвиток емфіземи та запальних реакцій у легеневій тканині при різних гострих і хронічних захворюваннях [18].

Одними із найбільш поширених методів молекулярно-водневої терапії є інгаляція сумішей газів, що містять H_2 з різним складом, вживання насиченої воднем води, а також інфузія чи ін'єкція розчину натрію хлориду, насиченого H_2. Кожен із цих підходів відрізняється своїми характеристиками, має певні переваги та недоліки, а також різні можливі молекулярні механізми дії. У межах більшості досліджень, спрямованих на оцінку ефективності використання водню, застосовувалися воднево-насичені розчини одного чи іншого типу [3, 9–11]. Однак зростає кількість досліджень, які розглядають інгаляцію водню, особливо в контексті клінічного застосування. Інгаляція H_2 є відносно простим методом впливу як на лабораторних тварин, так і на людей. Цей підхід був використаний Ікурогом Осавою (Ikuroh Ohsawa) та співавторами у моделі ішемії-реперфузії на щурах [3].

Численні експериментальні та клінічні дослідження [19–22, 7, 23–26] підтвердили, що молекулярний водень має селективної антиоксидантну активність щодо найбільш цитотоксичних (небезпечних для організму) вільних радикалів, а також надає інші позитивні ефекти: протизапальний, антиапоптозних, протиалергічний, а також стимулює енергетичний метаболізм. При цьому побічні ефекти вкрай незначні навіть при введенні в організм високих концентраціях водню, що дозволяє говорити про безпеку і відсутності протипоказань до застосування водневої терапії [20].

Постановка завдання. На основі аналізу літературних джерел установлено, що поєднане використання водневої, кисневої та озонової терапії має переваги в ефективності лікування порівняно з озоновою терапією та водневою терапією в окремому застосуванні.

У зв'язку з ефективністю застосування воднево-киснево-озоної терапії постала необхідність створення єдиного приладу, що працює в широкому діапазоні впливу на організм, задовольняє критеріям максимального числа відомих лікувальних методик.

Мета цієї роботи полягала у дослідженні ефективності застосування воднево-киснево-озоної терапії та розробці єдиного приладу для поєднаних воднево-киснево-озоної терапії.

Виклад основного матеріалу. Відомий апарат для озонової терапії універсальний медичний [27], який містить розрядну камеру, вимірник концентрації озону у вигляді проточної кювети, вимірник тиску, блок регулювання витрати газової суміші.

Відомий прилад для озонової терапії [28], який містить джерело медичного кисню, перемикач витрати кисню, розміщений між регулятором тиску та регулятором озону.

Недоліками цих пристроїв є використання як джерело кисню балонів із стисненим киснем, що надає пристроям додаткової ваги та потребує додаткових витрат на обслуговування. Пристрої

призначені для озонової терапії лише у вузькому діапазоні використання, що пов'язане з відсутністю чіткого контролю озону в озон-кисневій суміші та є небезпечним.

Відомий прилад для подачі газоподібного водню в живий організм [29], який містить електролітичну камеру, в якій піддають електролізу неочищену воду, мембрану, що ділить камеру з середини та зовні, пару електродних пластин, джерело живлення постійного струму, та вакуумний насос для подачі газу-розріджувача.

Недоліками пристрою є використання у якості газу-розріджувача – звичайного повітря. Анодна частина електролітичної камери при цьому для озон-кисневої суміші не використовується, що звужує функціональні можливості пристрою та не уможливлює контроль концентрації озону в озон-кисневій суміші.

Відомий також, обраний як прототип, прилад для озон-водневої терапії [30], що містить електролітичну камеру, розділену полімерною мембраною на анодну та катодну частини, датчик тиску водню, регулятор потоку водню. Катодна частина камери сполучена з першою окремою місткістю для дистильованою води, зв'язаною з блоком управління і живлення за допомогою датчика тиску водню, яка сполучена з регулятором-перемикачем напрямку подачі водню, який сполучений з вихідним патрубком водню та місткістю для насичення розчинів воднем. Анодна частина камери сполучена з іншою окремою місткістю для дистильованої води, яка за допомогою датчика тиску озон-кисневої суміші зв'язана з блоком управління і живлення та буферною місткістю для накопичення стиснутої озон-кисневої суміші, яка у свою чергу послідовно з'єднана з регулятором концентрації озону, вимірювачем концентрації озону, та регулятором потоку, що сполучений з вихідним патрубком озон-кисневої суміші.

До недоліків цього пристрою слід віднести те, що його анодна частина електролітичної камери використовується тільки для отримання озон-кисневої суміші, не дозволяє окремо отримати якісний кисень, що звужує функціональні можливості пристрою. Також указаний прототип не містить осушувачів озон-кисневої суміші, що також звужує температурний інтервал його використання.

В основу корисної моделі [31] нами було поставлено задачу удосконалення приладу для воднево-киснево-озонової терапії шляхом додаткового оснащення пристрою осушувачем водню та осушувачем кисню, датчиком тиску кисню, регулятором та вимірювачем концентрації кисню, регулятором перемикачем напряму подачі кисню, місткістю для насичення інгаляційних розчинів воднем, назальною маскою для інгаляцій забезпечується розширення функціональних можливостей заявленого приладу.

Поставлена задача удосконалити прилад вирішена тим, що у відомому приладі для озон-водневої терапії, який містить електролітичну камеру, розділену полімерною мембраною на анодну та катодну частини, датчик тиску водню, регулятор потоку водню. Катодна частина камери сполучена з першою окремою місткістю для дистильованою води, зв'язаною з блоком управління і живлення за допомогою датчика тиску водню, яка сполучена з регулятором-перемикачем напрямку подачі водню, який сполучений з вихідним патрубком водню та місткістю для насичення розчинів воднем. Анодна частина камери сполучена з іншою окремою місткістю для дистильованої води, яка за допомогою датчика тиску озон-кисневої суміші зв'язана з блоком управління і живлення та буферною місткістю для накопичення стиснутої озон-кисневої суміші, яка у свою чергу послідовно з'єднана з регулятором концентрації озону, вимірювачем концентрації озону, та регулятором потоку, що сполучений з вихідним патрубком озон-кисневої суміші, згідно [31] катодна частина камери сполучена з першою окремою місткістю для дистильованою води, зв'язаною з блоком управління і живлення за допомогою датчика тиску водню, яка сполучена з осушувачем водню, який сполучено з регулятором-перемикачем напрямку подачі водню, який сполучений з вихідним патрубком водню та місткістю для насичення розчинів воднем, який сполучено з назальною маскою для інгаляцій. Анодна частина камери сполучена з іншою окремою місткістю для дистильованої води, яка за допомогою датчика тиску кисневої суміші зв'язана з блоком управління і живлення та осушувачем кисню, який у свою чергу послідовно з'єднаний з регулятором концентрації кисню, вимірювачем концентрації кисню, та регулятором потоку, що сполучений з вихідним патрубком подачі кисню назовні та вихідним патрубком кисню внутрішнім, який сполучено з назальною маскою для інгаляцій та озонатором, який у свою чергу сполучений з регулятором концентрації озону, вимірювачем концентрації озону, що сполучений з вихідним патрубком озону, який

послідовно сполучено з назальною маскою для інгаляцій.

Сукупність ознак заявленого приладу і технічний результат, що досягається, мають між собою причино наслідковий зв'язок. Саме завдяки запропонованій корисній моделі вирішується задача розширення функціональних можливостей прототипу і підвищення його ефективності.

Датчик тиску кисню, регулятор концентрації кисню, вимірювач концентрації кисню та регулятор потоку кисню забезпечують розширення функціональних можливостей заявленого пристрою за рахунок можливості роботи пристрою в режимі генерації кисню в трьох режимах, а саме режим подачі кисню назовні для використання за межами пристрою (наприклад заправка балонів медичних кисневих апаратів чи кисневої терапії), режим подачі кисню до назальної маски і її використання як кисневої маски, режим подачі кисню до озонатора для подальшого його озонування.

Осушувач кисню і осушувач водню для отримання кисню та водню покращеної якості.

Використання маски для інгаляцій (конюлі назальної) забезпечують розширення функціональних можливостей заявленого пристрою за рахунок можливості роботи пристрою як інгалятора з проведенням киснево-воднево-озонової терапії органів системи дихання з використанням інгаляційних розчинів та без них. За потреби прилад можна використовувати для забезпечення хворих киснем (кисneва маска).

Регулятор-перемикач напрямку подачі водню, сполучений з вихідним патрубком водню, місткістю для насичення інгаляційних розчинів воднем та інгаляційною маскою забезпечують розширення функціональних можливостей заявленого пристрою за рахунок можливості роботи пристрою в режимі генерації водню в двох режимах, а саме режим подачі водню назовні, для використання за межами пристрою та режимі воднevої інгаляції.

Озонатор сполучений з регулятором концентрації озону, вимірювачем концентрації озону та конюлею назальною забезпечують розширення функціональних можливостей заявленого пристрою за рахунок можливості роботи пристрою в режимі інгаляційної озонотерапії.

На рис. 1 зображена принципова схема приладу для воднево-киснево-озонової терапії.

Прилад для воднево-киснево-озонової терапії містить: блок управління і живлення *1*, електролізер *3* (електролітичну камеру розділену полімерною мембраною з утворенням катодної і анодної частин камери), катодна частина камери сполучена з першою окремою місткістю *2* для дистильованої води, яка зв'язана з блоком управління і живлення *1* за допомогою датчика тиску водню *15*, з осушувачем водню *16*, який сполучений з регулятором-перемикачем напрямку подачі водню *14*, який зв'язаний з вихідним патрубком водню на зовні, місткістю *13* для насичення інгаляційних розчинів воднем та назальною маскою *12*; анодна частина електролізера *3* сполучена з другою окремою місткістю *2* для дистильованої води, яку за допомогою датчика тиску кисню *5* поєднано з блоком управління і живлення *1*, осушувачем кисню *4*, який в свою чергу послідовно з'єднано з регулятором концентрації кисню *6*, вимірювачем концентрації кисню *7* та регулятором перемикачем напряму подачі кисню *8*, що сполучений з вихідним патрубком подачі кисню назовні, з назальною маскою *12* та озонатором *9*, який у свою чергу послідовно сполучено з регулятором концентрації озону *10*, вимірювачем концентрації озону *11* та назальною маскою *12*.

Прилад працює таким чином. Під час режиму подачі водню для використання за межами пристрою, регулятор-перемикач *14* встановлюють

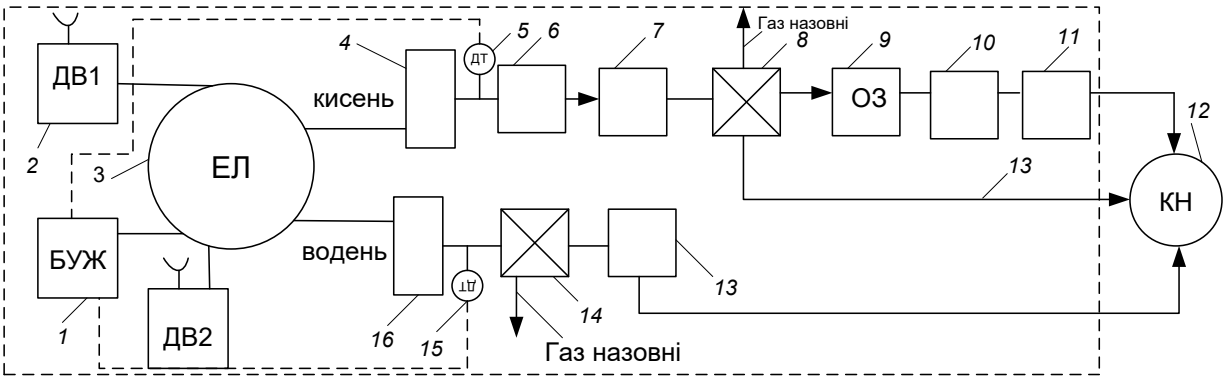


Рис. 1. Принципова схема приладу для воднево-киснево-озонової терапії

в положення «газ назовні», блок управління та живлення *1* вмикає живлення на електролізер *3*, водень через регулятор-перемикач *14* і вихідний патрубок виходить назовні для проведення процедури пацієнту. Після завершення процедури регулятор-перемикач *14* переводять в нейтральне положення.

В блоці управління і живлення *1* підтримується заданий тиск водню в системі за допомогою датчика *15* шляхом вмикання та вимикання електролізера *3*.

Під час режиму роботи пристрою в режимі генерації водню для інгаляційної водневої терапії на електролізер *3* з блока управління та живлення *1* вмикають живлення, регулятор – перемикач напрямку подачі водню *14* встановлюють в положення, при якому водень переміщується від осушувача *16* до місткості *13* до досягнення заданого оператором тиску, після чого регулятор-перемикач *14* переводять в нейтральне положення. Прилад працює постійно на підтримання тиску в системі, а живлення електролізера *3* автоматично вимикається у випадку спрацьовування датчика тиску *15*.

Під час роботи пристрою в режимі генератора кисню чи озону в блоці управління та живлення *1* встановлюють необхідну швидкість потоку озону чи кисню за допомогою регулятора перемикач напряму подачі кисню *8*, регулюють концентрацію кисню за допомогою регулятора концентрації кисню *6* та вимірювача концентрації кисню *7*, регулюють концентрацію озону в озон-кисневій суміші за допомогою регулятора концентрації озону *10* та вимірювача концентрації озону *11*, щоб показники вимірювачів *7* та *11* відповідали заданій концентрації кисню та озону відповідно.

У випадку, коли прилад довготривалий час працює як джерело водню, надлишковий тиск в системі скидають крізь послідовно з'єднані регулятор концентрації кисню *6* та озону *10*, вимірювач концентрації кисню *7* та озону *11*, регулятор перемикач напряму подачі кисню *8*. При цьому регулятор концентрації кисню *6* встановлюють таким чином, щоб концентрація кисню дорівнювала нульовій позначці.

У випадку, коли прилад довготривалий час працює як джерело кисню чи озону, надлишок водню з системи скидають назовні за допомогою регулятора-перемикача *14* і вихідного патрубка.

Прилад може працювати в режимі інгалятора з подачею таких газових сумішей: водень з повітрям (концентрація H_2 до 66%), водень з киснем (концентрація H_2 до 66%, концентрація O_2 до 33%), водень з озоном, кисень (чистота O_2 до 99,99%), кисень з озоном, озон. Максимальний тиск газів у системі пристрою до 1 МПа.

Висновки. Проведені аналітичні дослідження дали змогу встановити позитивний ефект від використання воднево-кеснево-озонової терапії. Зокрема встановлено, що озонотерапія сприяє поліпшенню насичення тканин киснем. Використання системної озонотерапії ефективне в лікуванні широкого спектру захворювань. Такі хвороби, як атеросклероз, наслідки ішемічного інсульту, вегето-судинна дистонія, мігрень та цукровий діабет, можуть бути успішно контрольовані безболісно та без побічних ефектів завдяки озону.

Киснева терапія найчастіше показана при дихальних та серцевих розладах. Киснева терапія зазвичай призначається при респіраторних та серцевих захворюваннях. Киснева терапія ефективно усуває симптоми дихальної недостатності та має позитивний вплив на серцево-судинну систему. Покращене кровообіг призводить до нормалізації артеріального тиску.

Аналіз наукових праць підтвердив, що молекулярний водень має селективної антиоксидантну активність щодо найбільш цитотоксичних (небезпечних для організму) вільних радикалів, а також надає інші позитивні ефекти: протизапальний, антиапоптозних, протиалергічний, а також стимулює енергетичний метаболізм. При цьому побічні ефекти вкрай незначні навіть при введенні в організм високих концентраціях водню, що дозволяє говорити про безпеку і відсутності протипоказань до застосування водневої терапії.

Запропонований прилад дозволяє значно розширити його функціональні можливості щодо використання в різних методиках лікування за допомогою воднево-кеснево-озонової терапії. Прилад дозволяє проводити насичення воднем фізіологічних розчинів, що знаходяться у герметичних стерильних пластикових пакетах, насичувати водні розчини воднем, використовувати воднево-кеснево-озонову (ВКО) суміш для проточного зрошення, використання озонованої чи збагаченої воднем води або олії в бапьнеозонотерапії. Прилад дозволяє проводити інгаляційну ВКО терапію, використовувати його для забезпечення пацієнтів киснем. Використовувати в комплексному лікуванні та профілактиці багатьох захворювань.

Список літератури:

1. Озонотерапія. Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: https://surl.li/vdrwzi (дата звернення: 01.05.2025).
2. Маленков А.Г. Вплив озону на організм, бактерії і віруси. URL: https://surl.lu/rbzirz (дата звернення: 01.05.2025).
3. Ikuroh Ohsawa, Masahiro Ishikawa, Kumiko Takahashi, Megumi Watanabe, Kiyomi Nishimaki, Kumi Yamagata, Ken-ichiro Katsura, Yasuo Katayama, Sadamitsu Asoh и Shigeo Ohta. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. 2007. Nature (13) : 688–694.
5. Озон у медицині (Озонотерапія). Клініка Біляка. Інноваційні технології у генікології, урології, хірургії, онкології. URL: https://bilyak.com.ua/korysne/ozon-u-medicini-ozonoterapiya/ (дата звернення: 01.05.2025).
6. Киснева терапія. Бібліотека здоров'я. Національна медична бібліотека. URL: https://www.chcrr.org/uk/health-topic/oxygen-therapy/ (дата звернення: 01.05.2025).
7. Покотило О.О., Покотило О.С., Корда М.М. Ефекти біологічної дії молекулярного водню. Медична та клінічна хімія. 2023. Т. 25. № 2. С. 102–121. DOI 10.11603/mcch.2410-681X.2023.i2.13980.
8. Ichihara, M., Sobue, S., Ito, M., Ito, M., Hirayama, M., et al. Beneficial biological effects and the underlying mechanisms of molecular hydrogencomprehensive review of 321 original articles. 2015. Med. Gas Res., 5, 1–21.
9. Shen, M., Zhang, H., Yu, C., Wang, F., Sun, X. A review of experimental studies of hydrogen as a new therapeutic agent in emergency and critical care medicine. 2014. Med. Gas Res., 4, 17.
10. Hirano, S.I., Ichikawa, Y., Kurokawa, R., Takefuji, Y., Satoh, F. A "philosophical molecule", hydrogen may overcome senescence and intractable diseases. 2020. Med. Gas Res., 10, 47–49.
11. Tao, G., Song, G., Qin, S. Molecular hydrogen: Current knowledge on mechanism in alleviating free radical damage and diseases. 2019. Acta Biochim. Biophys. Sin., 51, 1189–1197.
12. Wang, L., Zhao, C., Wu, S., Xiao, G., Zhuge, X., et al. Hydrogen gas treatment improves the neurological outcome after traumatic brain injury via increasing miR-21 expression. 2018. Shock., 50, 308–315.
13. Wu, J., Wang, R., Yang, D., Tang, W., Chen, Z., et al. Hydrogen postconditioning promotes survival of rat retinal ganglion cells against ischemia reperfusion injury through the PI3K. 2021. Akt pathway. Biochem. Biophys. Res. Commun., 495, 2462–2468.
14. Hirano, S.-I., Ichikawa, Y., Sato, B., Yamamoto, H., Takefuji, Y., et al. Molecular Hydrogen as a Potential Clinically Applicable Radioprotective Agent. 2021. Int. J. Mol. Sci., 22, 4566.
15. Hu, Q., Zhou, Y., Wu, S., Wu, W., Deng, Y., et al. Molecular hydrogen: A potential radioprotective agent. 2020. Biomed. Pharmacother., 130, 110589.
16. Runtuwene, J., Amitani, H., Amitani, M., Asakawa, A., Cheng, K.C., et al. Hydrogen-water enhances 5-fluorouracil-induced inhibition of colon cancer. 2015. PeerJ., 3, 859.
17. Hirano, S.-I., Yamamoto, H., Ichikawa, Y., Sato, B., Takefuji, Y., [et al] Molecular Hydrogen as a Novel Antitumor Agent: Possible Mechanisms Underlying Gene Expression. 2021. Int. J. Mol. Sci., 22, 8724.
18. Wang, D., Wang, L., Zhang, Y., Zhao, Y., Chen, G. Hydrogen gas inhibits lung cancer progression through targeting SMC. 2018. Biomed. Pharmacol., 104, 788–797.
19. Liu S, Sun X, Tao H. Hydrogen: from a biologically inert gas to a unique antioxidant. In: Molecular Mechanisms and Biological Effects (Ed. Volodymyr Lushchak). 2012. Rijeka: InTech.
20. Hoshino T. Challenges: new knowledge, new techniques. URL: http://www.mizukagaku.com/pdf/HSA6.pdf.
21. Kurokawa R., Seo T., Sato B., Hirano S., Sato F. Convenient methods for ingestion of molecular hydrogen: drinking,injection,andinhalation.MedicalGasResearch.2015.URL:http://medicalgasresearch.biomedcentral.com/articles/10.1156/s13615-015-0034-2.
22. Sun X., Ohta S., Nakao A. Hydrogen Molecular Biology and Medicine. Springer, 2015. URL: https://surl.li/gdcxbu
23. Buchholz, B.M., Masutani, K., Kawamura, T., Peng, X., Toyoda, Y., et al. Hydrogen-enriched preservation protects the isogeneic intestinal graft and amends recipient gastric function during transplantation. 2011. Transplantation, 92, 985–992.
24. Deng, L., Du, C., Song, P., Chen, T., Rui, S., et al. The Role of Oxidative Stress and Antioxidants in Diabetic Wound Healing. 2021. Oxidative Med. Cell. Longev., 2021, 8852759.
25. Lin, T.K., Zhong, L., Santiago, J.L. AntiInflammatory and Skin Barrier Repair Effects of Topical Application of Some Plant Oils. Int. J. 2017. Mol. Sci., 19, 70.
26. Litwiniuk, M., Krejner, A., Speyrer, M.S., Gauto, A.R., Grzela, T. Hyaluronic Acid in Inflammation and Tissue Regeneration. 2016. Wounds, 28, 78–88.
27. Спосіб інгаляційної озонотерапії: пат. на КМ України № 6133, МПК А61М 15/02, заявл. 04.10.2004, опубл. 15.04.2005, бюл. № 4.

28. Апарат для озонотерапії універсальний медичний: пат. на КМ України № 2398, МПК 7 А61Н 33/14. заявл. 01.07.2003, опубл. 15.03.2004, бюл. № 3.

29. Пристрій для отримання озоно-кисневої суміші: пат. № 40990, МПК 7 А61М 15/02, А61Н 33/14. заявл. 26.12.2008, опубл. 27.04.2009, бюл. № 8.

30. Пристрій для озоноводневої терапії: пат. на КМ України № 115044, МПК А 61 М 15/02, С 25 В 1/04, заявл. 21.11.2016, опубл. 27.03.2017, бюл. № 6.

31. Пристрій для воднево-киснево-озонової терапії: заявка на корисну модель. 202403785 МПК 7 А 61 М 15/02, С 25 В/04. заявл. 07.08.2024.

Trofimov I.L., Matveyeva O.L., Chumak V.L., Efimenko V.V., Levchenko S.V. DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR HYDROGEN-OXYGEN-OZONE THERAPY

The article provides an analysis of scientific literature on the influence of ozone, oxygen and molecular hydrogen, depending on the pathways of administration, at different levels organization of the organism in different pathological conditions, as well as discussing possible directions their joint use in medicine. It is established that the use systemic ozone therapy is effective in the treatment a wide range diseases, in particular diseases such as atherosclerosis, the effects of ischemic stroke, vegetative-vascular dystonia, migraine and diabetes, can be successfully controlled painlessly and without side effects due to ozone. Oxygen therapy is usually prescribed for respiratory and heart disease, effectively eliminates symptoms of respiratory failure and has a positive effect on the cardiovascular system. Hydrogen therapy gives positive antiapoptous, anti -allergic effects, and stimulates energy metabolism. In this case, the side effects are extremely insignificant even with the introduction high hydrogen concentrations into the body, which allows you to speak about safety and no contraindications to the use of hydrogen therapy. The designed utility model of the device for hydrogen-oxygen-ozone therapy, which belongs to the chemical technologies of medicinal substances and medical devices, namely for medical equipment for hydrogen-oxygen-oxygen-ozonic inhalation and can be used in medicine and clinical practice, which has been treated, has been used for treatment. The proposed device can significantly expand its functionality for use in various methods of treatment with the help of hydrogen-oxygen-ozone therapy. The device allows to saturate with hydrogen saline solutions found in sealed sterile plastic bags, to saturate aqueous solutions with hydrogen, to use a hydrogen-oxygen-ozonic mixture for flowing, the use of ozone or hydrogen water or oil in bapneosonotherapy. The projected device can be used in complex treatment and prevention of many diseases.

Key words: *medical equipment, treatment, molecular hydrogen, hydrogen therapy, oxygen therapy, ozone therapy, inhalation, utility model.*

УДК 544.72
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/38

Шаповал В.М.
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Пилипенко О.І.
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Зайцева І.С.
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Панайотова Т.Д.
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Смирнов О.О.
Національний науковий центр «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса»

СПЕКТОРФОТОМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОКІЛЬКОСТЕЙ ІОНІВ НІКЕЛЮ У СУЛЬФАТНИХ РОЗЧИНАХ

У представленій роботі показана важливість проблеми видалення зі стічних вод небезпечного класу забрудників – іонів важких металів. Наданий короткий огляд існуючих методів очищення води від цих іонів, їх переваги та недоліки. Показано, що перспективним методом очищення є іонообмінна сорбція. Вказано на важливість проведення поточного контролю сорбції та її кінцевого результату та запропоновано використати для цієї мети оптичний метод аналізу. Проведена експериментальна перевірка методики фотометричного визначення іонів нікелю з складі його комплексної сполуки з диметилгліоксимом у окиснювальному середовищі йоду. Для виконання роботи була підготовлена серія стандартних розчинів нікелю сульфату із заданою концентрацією іонів нікелю. До відібраної аліквоти стандартного розчину додавали розчин йоду та 1% лужний розчин диметилгліоксиму. У результаті утворення комплексної сполуки розчини забарвлювались; залежно від концентрації іонів нікелю колір забарвлення розчинів змінювався від вишневого до коричнево-вишневого. Після додавання реагентів та витримки проб розчинів протягом 10 хвилин проводили їх фотометрування за допомогою спектрофотометра Shimadzu UV-1800. За результатами вимірювань була отримана серія спектрів поглинання стандартних сульфатних розчинів. Максимум поглинання на оптичних спектрах відповідав довжині хвилі λ = 466 нм. Обробка одержаної серії спектрів (визначення величин максимумів поглинання) дозволила одержати залежність поглинання розчинів (їх оптичної густини D) від концентрації нікелю у середовищі. Отриманий калібрувальний графік являє собою лінійну залежність, що вказує на придатність запропонованої методики спектрофотометричного аналізу для визначення концентрації іонів нікелю під час іонообмінної сорбції катіонітом з сульфатних розчинів на рівні мікрокількостей.

Ключові слова: *нікель, іони важких металів, сорбція, іонообмінна смола, спектрофотометрія, диметилгліоксим.*

Постановка проблеми. Ефективне використання результатів наукових досліджень з розробки новітніх технологій є невід'ємною рисою будь-якого високотехнологічного суспільства. Однак використання передових технологій супроводжується певними ризиками й має певну ціну. Відомо, що потреби сучасного суспільства забезпечує використання значної кількості речовин та матеріалів на їх основі, які застосовуються для створення різноманітних пристроїв та виробів. Їх промислове виробництво супроводжується утворенням великої кількості відходів, у тому числі й токсичних, які мають негативний вплив на навколишнє середовище. До небезпечних

забрудників довкілля, зокрема, відносяться іони важких металів. Потрапляння важких металів у іонній формі у воду призводить до призводить до розповсюдження забрудника з високою швидкістю [1, с. 2]. Негативна дія іонів важких металів проявляється вже за наявності їх у воді в мікрокількостях [2, с. 5].

Джерелами утворення стічних вод, які містять ці іони, є насамперед проведення видобутку металічних руд та хімічні або електрохімічні процеси обробки металів [3, с. 1]. Відповідно основними забруднювачами навколишнього середовища важкими металами є видобувна, хімічна, металургійна та машинобудівна промисловість [4, с. 167].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення проблеми очищення стічних вод від іонів металів запропонований ряд методів. Найбільш поширеним є метод хімічного очищення за допомогою додавання до забрудненої води реагентів, здатних утворювати з іонами металів важкорозчинні сполуками [5, с. 512]. Є перевагами є порівняно низька вартість, висока швидкість процесу та використання простої схеми очищення. Недолік методу – необхідність тривалого відстоювання обробленої води для осадження важкорозчинних сполук або її фільтрації; окрім цього виникає питання щодо подальшої переробки або захоронення отриманих сполук [6, с. 1502].

З метою вилучення іонів важких металів можна використовувати й метод екстракції [7, с. 3]. На даний час розроблені екстрагенти за допомогою яких можна проводити очищення та розділення майже всіх відомих металів з достатньо високою ефективністю. Однак така технологія потребує використання недешевих екстрагентів, спеціалізованого обладнання та кваліфікованого персоналу, оскільки вимагає ретельного контролю на всіх стадіях. Тому екстракція поки що не знайшла практичного застосування для очищення великих об'ємів промислових стічних вод [8, с. 14].

Перспективними методами очищення є використання різноманітних сорбційних матеріалів, які використовуються у сорбційній технології [9, с. 4]. Для проведення сорбції використовують як природні, так й синтетичні речовини [10, с. 1]. Серед останніх найбільшого поширення знайшли іонообмінні смоли. Вони складаються з полімерної матриці з прикріпленими функціональними групами, які здатні до дисоціації та еквівалентного обміну на іони розчину. Перевагами іонообмінних смол (іонітів) є відносна дешевизна, можливість регулювання властивостей та багаторазове використання. Сорбовані іони можна десорбувати та отримати розчин з вищим значенням концентрації іонів. Оскільки жодних хімічних змін з іонами під час сорбції та десорбції не відбувається це надає можливість виконувати очищення та розділення їх сумішей, а також повертати у промисловий процес цінні речовин [11, с. 383].

Вищесказане у повній мірі відноситься до такого небезпечного забрудника, як іони нікелю, наявність яких у воді має негативний вплив на організм людини [12, с. 221]. Нікель широко використовується у металургії, електроніці, машинобудуванні як легуючий компонент для створення хімічностійких сплавів, матеріал для виготовлення електродів або нанесення нікелевих покриттів. Саме ці виробництва є головними забруднювачами навколишнього середовища [13, с. 223].

Важливим моментом під час очищення стічних вод від іонів важких металів є контроль їх вилучення у процесі сорбції. Це дозволяє не лише вивчити кінетику сорбції, але й визначити час досягнення у системі сорбційної рівноваги та оптимальної тривалості контакту «сорбент – стічна вода» [14, с. 45]. Особливістю процесів очищення стічних вод є те, що іони важких металів знаходяться в них у мікрокількостях [15, с. 214], які важко визначати звичайним аналітичними методами або які потребують проведення попереднього концентрування.

Постановка завдання. Завдання роботи – експериментальна перевірка придатності методики спектрофотометричного визначення мікрокількостей іонів Ni^{2+} у комплексній сполуці з діметилгліоксимом без проведення попереднього концентрування нікелю.

Виклад основного матеріалу. Для індикації іонів нікелю використовували розчин диметилгліоксиму у лужному окислювальному середовищі (розчин йоду). У лужному середовищі (аміак, луги) за присутності окисників (Br_2, I_2, H_2O_2, $(NH_4)_2S_2O_8$) іони Ni^{2+} утворюють з диметилгліоксимом комплекс червоно-коричневого забарвлення. Комплексна сполука, утворена у лужному середовищі, має інтенсивну смугу поглинання з $\lambda_{макс.}$ = 470 нм та $\varepsilon_{макс.} = 1{,}3 \cdot 10^4$. Співвідношення «нікель – диметилгліоксим» у комплексній сполуці дорівнює 1:3. Використання розчину йоду є бажаним, оскільки комплекс, утворений за його присутності, більш стійкий у часі. Надлишок йоду не викликає окиснення диметилгліоксиму; це забезпечує хорошу відтворюваність результатів вимірювань.

1% розчин диметилгліоксиму готували розчиненням 1 г реактиву у 100 мл 20% розчину NaOH. Розчин 0,05 н йоду готували з відповідного фіксаналу.

Вимірювання проводили наступним чином. У 5 мірних колб об'ємом 50 мл наливали 20 мл води та 20 мл стандартних розчинів, які містили 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 та 0,10 мг нікелю сульфату (у перерахунку на метал) та додавали 0,5 мл 0,05 н розчину йоду і 0,5 мл розчину диметилгліоксиму. Колби доводили дистильованою водою до мітки. Після перемішування колби залишали у спокої на 10 хв, потім проводили спектрофотометричні визначення, використовуючи спектрофотометр Shimadzu UV-1800, та будували калібрувальний графік.

Аліквоту аналізованого розчину (20 мл) переносили у мірну колбу об'ємом 50 мл, додавали 20 мл води й далі проводили ті ж операції, що й під час приготування розчинів для градуювання. Через 10 хв розчини аналізували.

Вміст нікелю знаходили за калібрувальним графіком. Вимірювання для кожного розчину повторювали три рази. Розчини готували на дистильованій воді, використовуючи реактиви кваліфікації «хч».

Важливим моментом під час проведення сорбції є визначення оптимальної тривалості контакту іонообмінної смоли з розчином електроліту [16, с. 109]. Таке визначення можна провести за допомогою декількох методів. Фотометричний контроль процесу сорбції іонів нікелю є зручним способом, оскільки дозволяє швидко проводити контроль поточного стану сорбції. Використання методу дає можливість проводити визначення концентрації іонів Ni^{2+} на рівня десятих долів міліграма на літр, що є близьким до величини ГДК(Ni^{2+}) у питній воді (0,1 мг/л). Для проведення подібних вимірювань під час роботи використовували спектрофотометр Shimadzu UV-1800; прилад має програмне забезпечення, яке дозволяє проводити запис експериментальних даних у поточному режимі. Загальний вигляд приладу та калібрувальні розчини, що містять комплексну сполуку диметилгліоксиму з нікелем, наведений на рисунку 1; на рисунку 2 показаний знімок загального вигляду програмного забезпечення від розробника.

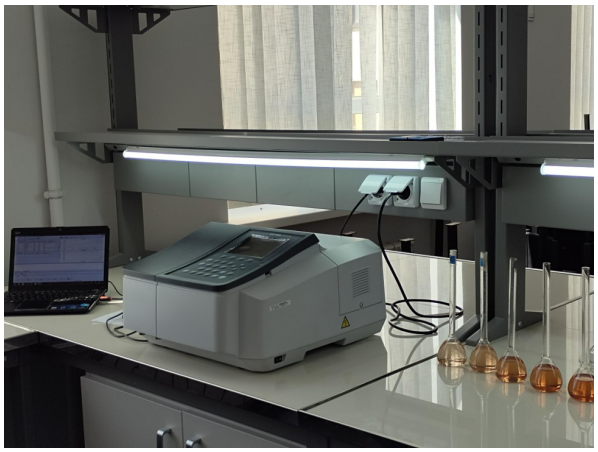


Рис. 1. Загальний вигляд спектрофотометра Shimadzu UV-1800 та лінійки калібрувальних розчинів

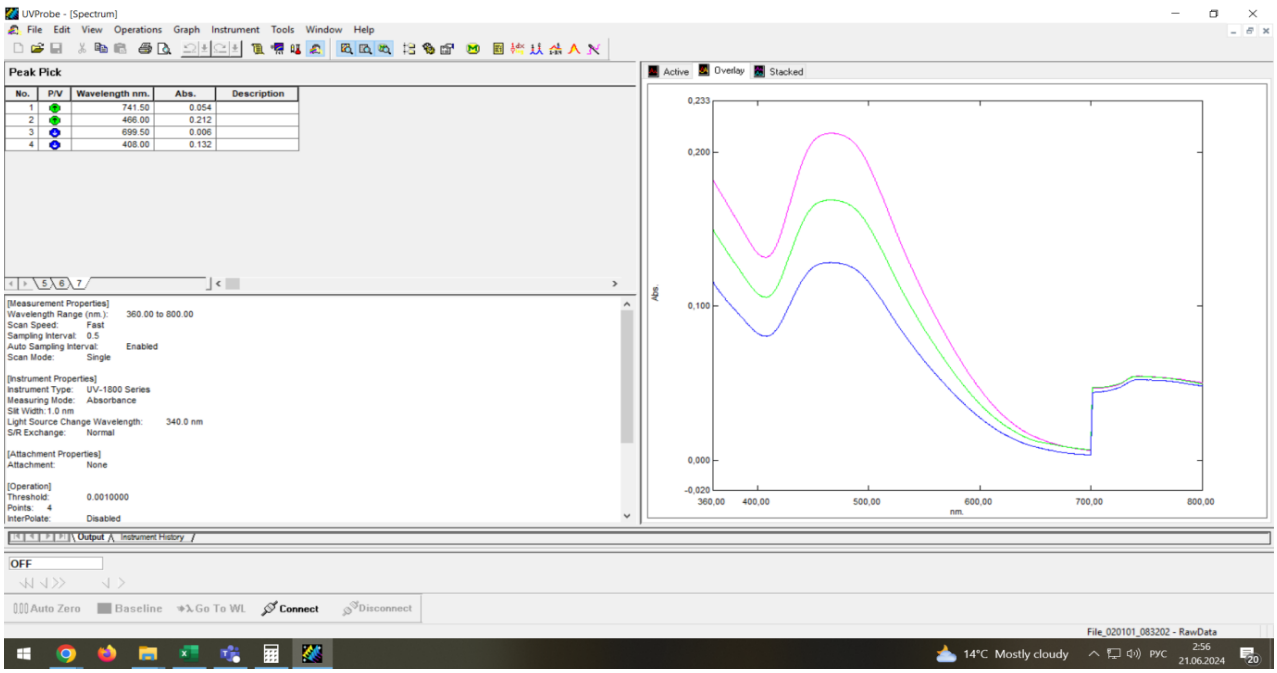


Рис. 2. Знімок загального вигляду програми від розробника

З метою експериментальної перевірки методики визначення мікрокількостей іонів нікелю у комплексній сполуці з диметилгліоксимом була використана серія стандартних калібрувальних розчинів, яка містила іони Ni^{2+} відомої концентрації. Концентрація іонів нікелю у калібрувальних розчинах знаходилась у межах 0,19–0,95 мг/л. Додавання до аліквоти калібрувальних розчину фіксаналу йоду та диметилгліоксиму обумовлювало їх вишневе забарвлення (рисунок 1, праворуч). Зменшення концентрації іонів металу викликало перехід забарвлення у коричево-вишневе. Залежність інтенсивності забарвлення стандартних розчинів від концентрації іонів металу обумовлює можливість їх фотометричного визначення.

Результати перевірки вищеописаної методики фотометричного визначення іонів Ni^{2+} показані на рисунках 3 та 4. Зокрема, на рисунку 3 наведена серія спектрів, одержаних за результатами вимірювань стандартних розчинів. Вона дозволяє зробити висновок про те, що максимальне поглинання (оптична густина) розчинів, які містять комплекс нікелю з диметилгліоксимом, відповідає довжині хвилі λ = 466 нм. Отриманий за результатами фотометрування калібрувальний графік (рисунок 4) вказує на лінійну залежність між концентрацією іонів Ni^{2+} у розчинах та інтенсивністю їх поглинання.

Визначення величин максимумів поглинання одержаних спектрів дозволяє одержати залежність поглинання розчину (його оптичної

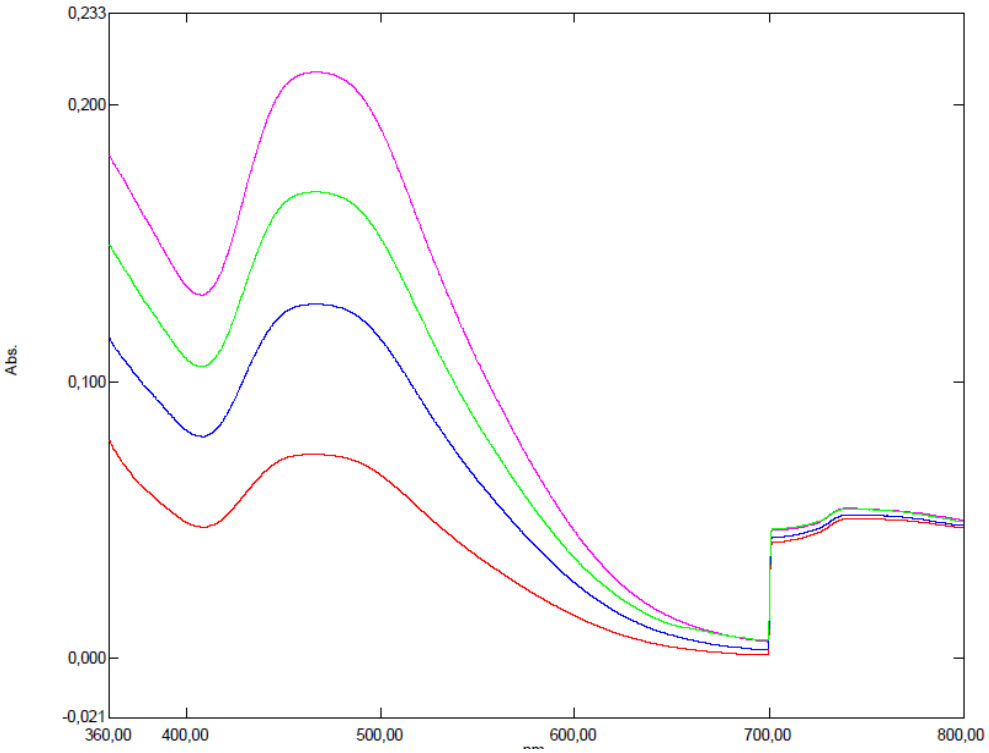


Рис. 3. Спектри поглинання стандартних розчинів комплексу іонів Ni^{2+} з диметилгліоксимом за окиснювальному середовищі йоду

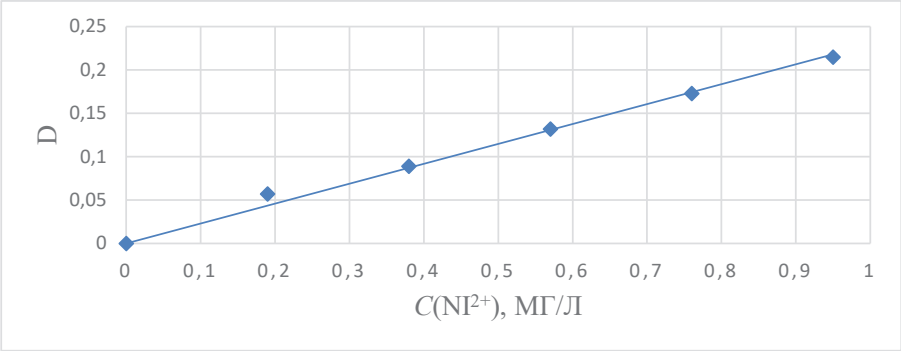


Рис. 4. Калібрувальний графік, отриманий обробкою спектрів з рисунка 3

густини *D*) від концентрації нікелю; дані показані на рисунку 4.

Таким чином, проведене дослідження вказує на придатність фотометричної методики визначення мікрокількостей іонів нікелю.

Висновки. Проведена експериментальна перевірка придатності спектрофотометричної методики визначення мікрокількостей іонів нікелю. За результатами проведених визначень показано, що комплексна сполука нікелю з диметилгліоксимом у окиснювальному середовищі йоду характеризується максимумом поглинання за довжини хвилі λ = 466 нм. Одержані спектри поглинання дозволили отримати калібрувальний графік у вигляді лінійної залежності оптичної густини розчинів від концентрації іонів Ni^{2+}, що дозволяє вважати обрану аналітичну методику коректною.

Список літератури:

1. Mitra S., Chakraborty A.J., Tareq A.M., Emran T.B., Nainu F., Khusro A., Idris A.M., Khandaker M.U., Osman H., Alhumaydhi F.A., Simal-Gandara J. Impact of Heavy Metals on the Environment and Human Health: Novel Therapeutic Insights to Counter the Toxicity. *Journal of King Saud University – Science*. 2022. Vol. 34. Iss. 3. 101865. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865
2. Singh V., Ahmed G., Vedika S., Kumar P., Chaturvedi S.K., Rai S.N., Vamanu E., Kumar A. Toxic Heavy Metal Ions Contamination in Water and Their Sustainable Reduction by Eco-friendly Methods: Isotherms, Thermodynamics and Kinetics Study. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 7595. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3
3. Rajoria S., Vashishtha M., Sangal V.K. Heavy Metal Ions in Wastewater: A Review on Detection and Toxicity. *Chemical Engineering and Process Techniques*. 2023. Vol. 8. Iss. 3. https://doi.org/10.47739/2333-6633/1082
4. Jomova K., Alomar S.Y., Nepovimova E., Kuca K., Valko M. Heavy Metals: Toxicity and Human Health Effects. Review Article. *Archives of Toxicology*. 2025. Vol. 99. P. 153–209. https://doi.org/10.1007/s00204-024-03903-2
5. Nishat A., Yusuf M., Qadir A., Ezaier Y., Vambol V., Khan M.I., Moussa S.B., Kamyab H., Sehgal S.S., Prakash C., Yang H.-H., Ibrahim H., Eldin S.M. Wastewater Treatment: A Short Assessment on Available Techniques. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 76. P. 505–516. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.054
6. Malik L.A., Bashir A., Qureashi A., Pandith A.H. Detection and Removal of Heavy Metal Ions: A Review. *Environmental Chemistry Letters*. 2019. Vol. 17. P. 1495–1521. https://doi.org/10.1007/s10311-019-00891-z
7. Saleh T.A., Mustaqeem M., Khaled M. Water Treatment Technologies in Removing Heavy Metal Ions from Wastewater: A Review. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag*. 2022. Vol. 17. 100617. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100617
8. Hegazy I., El-Sheikh R., Gouda A.A., Ali H.H., Hassanin M.A., Salem A.R. Extraction of Some Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions with New Eco-friendly Solvents. International Journal of Environmental Analytical Chemistry Received. 2025. https://doi.org/10.1080/03067319.2024.2445101
9. Alqahtani Z., Alghamdi N., Robshaw T.J., Dawson R., Ogden M.D., Buckely A., Grell M. Water-Gated Transistor Using Ion Exchange Resin for Potentiometric Fluoride Sensing. *Micromachines*. 2020. Vol. 11. 923. https://doi.org/10.3390/mi11100923
10. Lyu Y., Gan S., Bao Y., Zhong L., Xu J., Wang W., Liu Z., Ma Y., Yang G., Niu L. Solid-Contact Ion-Selective Electrodes: Response Mechanisms, Transducer Materials and Wearable Sensors. *Membranes*. 2020. Vol. 10. 128. https://doi.org/10.3390/membranes10060128
11. Pylypenko O., Zaitseva I., Panayotova T. "Smart" Sorbents Based on Iminodiacetic Acid for Selective Sorption of Heavy Metal Ions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 80. P. 382–390. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_34
12. Булавіна Д.А., Зайцева І.С., Пилипенко О.І. Нікель – прихована хімічна небезпека. Сталий розвиток міст*:* поствоєнний період : матеріали конференції. Харків, 2024. С. 221–223.
13. Шаповал В.М., Зайцева І.С., Пилипенко О.І. Очищення стічних вод від іонів нікелю методом іонної сорбції. Сталий розвиток міст*:* поствоєнний період : матеріали конференції. Харків, 2024. С. 223–225.
14. Jasim A.Q., Ajjam S.K. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater Using Ion Exchange Resin in a Batch Process with Kinetic Isotherm. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 49. P. 43–54. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.04.002
15. Silva1 D.L., Brunner G. Desorption of Heavy Metals from Ion Exchange Resin with Water and Carbon Dioxide. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2006. Vol. 23. No. 02. P. 213–218. https://doi.org/10.1590/S0104-66322006000200008
16. Зайцева І.С., Комихов С.О., Чебанов В.А., Десенко С.М. Спектроскопія ядерного магнітного резонансу в аналізі об'єктів довкілля. Комунальне господарство міст. 2017. Вип. 135. С. 108–111.

Shapoval V.M., Pylypenko O.I., Zayceva I.S., Panayotova T.D., Smirnov O.O.

SPECTROPHOTOMETRIC DETERMINATION OF MICROQUANTITY OF NICKEL IONS IN SULPHATE SOLUTIONS

The presented work shows the importance of the problem of removing a dangerous class of pollutants – heavy metal ions – from wastewater. A brief overview of existing methods of water purification from these ions, their advantages and disadvantages is provided. It is shown that ion-exchange sorption is a promising purification method. The importance of conducting current control of sorption and its final result is indicated and it is proposed to use an optical analysis method for this purpose. An experimental verification of the method of photometric determination of nickel ions from the composition of its complex compound with dimethylglyoxime in the oxidizing medium of iodine was carried out. To perform the work, a series of standard solutions of nickel sulfate with a given concentration of nickel ions was prepared. An iodine solution and a 1% alkaline solution of dimethylglyoxime were added to a selected aliquot of the standard solution. As a result of the formation of a complex compound, the solutions were colored; depending on the concentration of nickel ions, the color of the solutions changed from cherry to brown-cherry. After adding reagents and holding the solution samples for 10 minutes, their photometry was carried out using a Shimadzu UV-1800 spectrophotometer. According to the measurement results, a series of absorption spectra of standard sulfate solutions was obtained. The maximum absorption in the optical spectra corresponded to the wavelength λ = 466 nm. Processing the obtained series of spectra (determination of the values of the absorption maxima) made it possible to obtain the dependence of the absorption of solutions (their optical density D) on the concentration of nickel in the medium. The obtained calibration graph is a linear dependence, which indicates the suitability of the proposed spectrophotometric analysis method for determining the concentration of nickel ions during ion-exchange sorption by a cation exchanger from sulfate solutions at the level of microquantities.

Key words: *nickel, heavy metal ions, sorption, ion exchange resin, spectrophotometry, dimethylglyoxime, functional group.*

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.8.047
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/39

Дмитренко Н.В.
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Дабіжа Н.О.
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Гусарова О.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Малащук Н.С.
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Гусаров В.М.
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

ТЕПЛОМАСООБМІН В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ДИНІ ДО НИЗЬКОГО ЗАЛИШКОВОГО ВОЛОГОВМІСТУ

Стаття присвячена дослідженню тепломасообміну в процесі сушіння дині до низького залишкового вологовмісту. Зважаючи на нетривалий термін зберігання свіжої дині та необхідність утилізації відходів, сушіння є ефективним методом переробки. Наявність термолабільних речовин у складі дині, обмежує інтенсифікацію сушіння шляхом підвищення температури, а довготривалий тепловий вплив викликає руйнування вітамінів, карамелізацію цукрів і утворення меланоїдів.

Метою статті є визначення закономірностей тепломасообміну під час зневоднення дині для розроблення режимів конвективного сушіння до низької залишкової вологості, які забезпечать мінімізацію енерговитрат, збереження природнього складу дині та високу якість продукту (*чипсів*).

Було визначено сорбційні та теплофізичні властивості паренхімних тканин дині. Встановлено, що витрати енергії на десорбцію зв'язаної вологи зростають зі зменшенням вологовмісту. Виявлено піковий екзотермічний ефект в діапазоні вологовмістів 0,37…0,59 кг/кг с.м., який, ймовірно, пов'язаний з кристалізацією цукрів дині. Саме вміст цукрів пояснює хрустку структуру чипсів, підвищення їхніх смакових якостей і терміну зберігання.

За даними з кінетики сушіння паренхімних тканин дині розраховані оптимізаційний критерій Ребіндера та теплові потоки на поверхні матеріалу. Показано, що на початку процесу сушіння значна частина енергії витрачається на нагрівання матеріалу, а його різке зростання при вологовмісті 2,60 кг/кг с.м. вказує на доцільність зниження температури сушильного агента для раціонального використання теплоти та збереження якості продукту.

На підставі проведених комплексних досліджень запропоновано двостадійний режим сушіння дині при 80/60 °С. Використання високої температури 80 °С на першій стадії, інтенсифікує процес зневоднення, а її зниження до 60 °С на другій стадії, після досягнення матеріалом температури 50 °С, запобігає небажаним змінам у тканинах дині та руйнуванню термолабільних речовин. Розроблений режим дозволяє одержати динні чипси з природним кольором та смаком, легкою ламкістю та ніжним хрускотом.

Ключові слова: *диня, чипси, теплофізичні, сорбційні властивості, конвективне сушіння, критерій Ребіндера, енергоефективність.*

Постановка проблеми. В окремих регіонах України склались сприятливі умови для вирощування дині, однак, через короткий термін зберігання врожай потребує швидкої реалізації чи перероблення на продукти з подовженим терміном зберігання. Додатково виникає проблема утилізації м'якоті, яка залишається після вилучення насіння для відновлення посівного фонду.

Найпоширенішою технологією перероблення та збереження рослинної сировини є сушіння, але якість кінцевого продукту залежить від температури та швидкості процесу. Недотримання параметрів ведення процесу може призвести до небажаних фізико-хімічних змін, деформації тканин, активації небажаних ферментативних процесів або мікробного розмноження, що погіршує смакові та органолептичні властивості.

Враховуючи, що сушіння є енерговитратним процесом, актуальними залишаються дослідження зневоднення сировини з метою підвищення енергоефективності та забезпечення отримання продукту високої якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Характеристика дині як об'єкту сушіння.

Диня є термолабільним колоїдним капілярно-пористим матеріалом, що складається з різних за своєю структурою і складом частин. Плоди мають шкірку, ніжну соковиту м'якоть та насінєве гніздо з насінням у жорсткій оболонці.

М'якоть дині залежно від сорту має різні кольори та щільність, багата на різні цінні речовини, які наведено на рисунку 1. Цукри в дині представлені (у % до загальної кількості цукрів): глюкозою, фруктозою та сахарозою. Харчова цінність дині посилюється наявністю кислот (фолієва, аскорбінова тощо), ароматичних сполук, мінеральних речовин (калій, магній, кальцій, фосфор, хлор, сірка, залізо, цинк, йод, марганець, фтор, міть тощо), вітамінів (A, B_1, B_2, C, PP).

Завдяки високому вмісту фолієвої кислоти та заліза диня сприяє профілактиці атеросклерозу, підтримує кровотворення та нормалізує перебіг окислювальних процесів [1–6].

Такий унікальний склад робить м'якоть дині цінною для споживання частиною плода. М'якоть використовують для виготовлення цукатів, меду, варення, соків, компотів тощо. Диню сушать природнім та штучним шляхом з отриманням продуктів із проміжною вологістю (15…30% – в'ялена диня, сухофрукти) та низькою вологістю (5…8% – чипси).

Фруктово-овочеві чипси – це тонкі хрусткі скибочки із фруктів або овочів одержані сушінням. Такі чипси стають дедалі популярнішими серед споживачів, так як вони є здоровою альтернативою традиційним картопляним чипсам, мають корисний склад, низький вміст жиру, тривалий термін зберігання та різноманітність смаків, є зручними для легкого перекусу в дорозі чи на роботі.

Аналіз публікацій, присвячених особливостям сушіння плодів дині

На сьогоднішній день існує багато способів сушіння дині, які передбачають зневоднення як натуральної, так і попередньо обробленої сировини перед сушінням, різні методи зневоднення

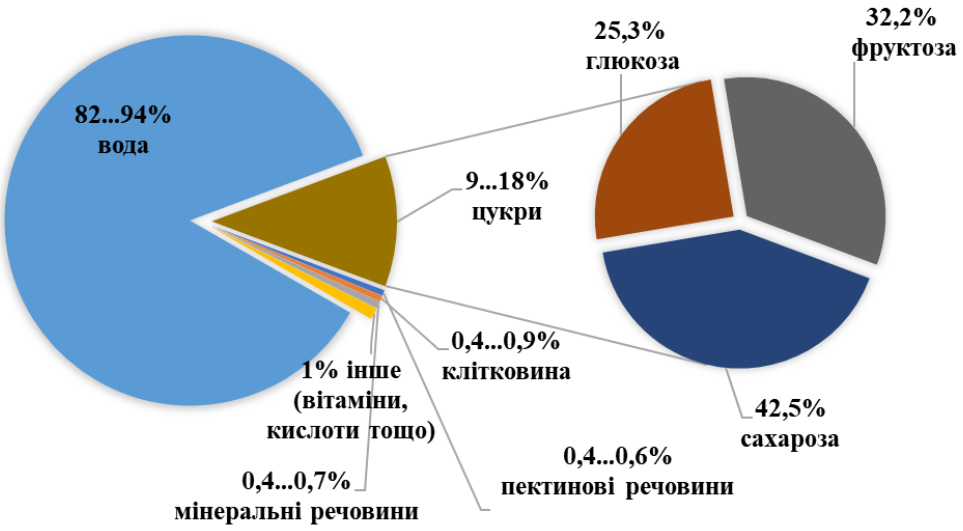


Рис. 1. Середній хімічний склад дині, % на сиру масу

Джерело: узагальнення даних [1–6]

та їх комбінування, використання різної форми нарізки (скибочки, кубики, кульки тощо).

Так, наприклад, у статті [7] наведені результати експериментальних досліджень процесу сушіння скибочок дині завтовшки 15, 18 та 21 мм в камерно-конвективній сушарці за температури теплоносія 70…80 °С. Встановлено, що оптимальна за якістю кінцевого продукту товщина скибочок становить 15 мм. Запропонований осцилювальний режим зневоднення з почерговим нагріванням та охолодженням продукту.

У результаті досліджень [8] закономірностей вологовидалення під час сушіння плодів дині розроблені стадійні режими зневоднення при температурі сушильного агента 95/70 °С, за яких інтенсифікується процес, знижуються втрати поживних речовин та зберігається якість готового продукту. Зниження температури з 95 °С до 70 °С забезпечує рівномірне видалення вологи без перегріву продукту.

У дослідженні [9] визначений вплив температури, швидкості сушильного агента та попередньої обробки сировини бланшуванням і осмотичною дегідратацією на ефективність випаровування вологи та збереження вітамінів під час зневоднення дині в інфрачервоній сушарці з рекуперацією сонячної теплоти. Оптимальний температурний режим, при якому не відбувається потемніння сировини та втрати біологічно-активних речовин, становить 50…70 °С.

Авторами [10, 11] проведені дослідження щодо впливу попередньої обробки скибочок дині ультразвуком на тривалість зневоднення та якісні показники готового продукту під час сушіння за температури від 50 до 80 °С. За результатами дослідження виявлена доцільність застосування ультразвуку для попередньої обробки дині.

Для часткового зневоднення дині широко використовують осмотичний спосіб попередньої обробки сировини [12, 13], що дозволяє сушити матеріал зі зниженим початковим вологовмістом. Це скорочує час сушіння, заощаджує енерговитрати та дозволяє уникнути тривалого впливу теплоти на продукт. Проте, використання як осмотичних рідин розчинів цукрів і солей призводить до втрати водорозчинних вітамінів, зменшення вмісту органічних кислот, проникненню сторонніх речовин у тканини дині, що змінює її натуральний смак і хімічний склад.

У країнах зі спекотним кліматом диню зневоднюють сонячно-повітряним способом після попередньої обробки, проте його ефективність обмежена несприятливими погодними умовами, тривалістю процесу та ризиком мікробіологічного обсіменіння.

Як видно з літературного огляду, чутливість дині до високих температур, через наявність у складі термолабільних речовин, обмежує інтенсифікацію сушіння шляхом підвищення температури, а довготривалий тепловий вплив викликає руйнування вітамінів, карамелізацію цукрів і утворення меланоїдинів. Зростання концентрації цукрів у клітинному соці уповільнює зневоднення, підвищуючи енерговитрати.

Розглянуті дослідження способів обробки та сушіння дині викликають значний інтерес. Проте, слід зазначити, що дослідження з вибору оптимальних з точки зору ефективного використання теплоти технологічних параметрів процесу сушіння дині відсутні. Проведення всебічних досліджень властивостей дині як об'єкта сушіння з визначенням термодинамічних та теплофізичних характеристик дозволяє за кінетикою зневоднення розраховувати оптимізаційний критерій Ребіндера та теплові потоки на поверхні матеріалу в процесі сушіння. Результати таких досліджень є основою для розроблення енергоефективних режимів зневоднення і використовуються при проєктуванні та оптимізації сушильних установок.

Постановка завдання. Метою статті є визначення закономірностей тепломасообміну під час зневоднення дині для розроблення режимів конвективного сушіння до низької залишкової вологості, які забезпечать мінімізацію енерговитрат, а також збереження природнього складу дині та високу якість продукту.

Матеріали та методи. Для дослідження особливостей зневоднення м'якоті дині використовували сорт «Ананас». Перед дослідами плоди мили проточною водою і розрізали навпіл. Насіння видаляли, з м'якоті робили зрізи паренхімних тканин завтовшки до 5 мм. Досліджувані зразки м'якоті дині мали високий ступінь біологічної стиглості: були розпливчаті, соковиті, солодкі на смак.

Вміст вологи в зразках визначали як відношення маси вологи до маси вологого матеріалу – відносна вологість W (%), або як відношення маси вологи до маси абсолютно сухого матеріалу – вологовміст u (кг/кг с.м.). Початкова відносна вологість м'якоті дині у свіжому стані визначалася за ДСТУ 7804:2015 і варіювалась в межах 92,9…94,1 %.

Дослідження гігротермічного рівноважного стану дині проводилися з застосуванням

тензометричного (статичного) методу Ван Бамелена з авторськими уточненнями [14]. Згідно методу зразки висушеного матеріалу в бюксах витримують в ексикаторах над водними розчинами сірчаної кислоти. При певній температурі та концентрації сірчаної кислоти в ексикаторі встановлюється парціальний тиск пари p, що відповідає цій концентрації та відносному тиску p/p_s. Відносна вологість повітря визначається як $\varphi = p/p_s \cdot 100$. Зразки періодично зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г до моменту досягнення ними постійної маси, що свідчить про настання стану рівноваги при даній температурі й відносній вологості повітря. Рівноважний вологовміст матеріалу u_p визначається як відношення маси вологи в матеріалі в рівноважному стані до маси сухого матеріалу.

За ізотермами сорбції, використовуючи інтегральну форму рівняння Клаузіуса-Клапейрона, визначається чиста теплота адсорбції q_a для фіксованих значень вологовмісту за рівнянням (1) [14]:

$$q_a = \left[\ln\left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1}\right) / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \right] R \,. \qquad (1)$$

Дослідження основних закономірностей тепло- і масообміну процесу конвективного сушіння дині проводилися на експериментальному сушильному стенді з системою автоматичного збору й обробки інформації. Після встановлення режиму сушіння підготовлені зразки розміщували на сітчастому піддоні робочої вимірювальної камери та вмикали комп'ютер для збору інформації за допомогою програми "Sooshka", яка реєструє та виводить на екран температуру сушильного агента t_c, температуру зразка t та змінювання маси зразка під час зневоднення [15]. Дослідження проводилися за таких режимних параметрів процесу: температура сушильного агенту t_c – 60 і 80 °С; швидкість сушильного агенту v – 2 м/с; вологовміст сушильного агенту d – 13 г/кг с.п.; початкове питоме навантаження матеріалу – 5,3 кг/м^2. За експериментальними даними з кінетики сушіння паренхімних тканин дині одержані криві $u = f(\tau)$, $t = f(\tau)$, $du/d\tau = f(u)$, $t = f(u)$.

За даними з кінетики вологообміну можливо встановити кінетику теплообміну під час сушіння дині. Розрахунок енергетичних характеристик процесу – критерію оптимізації процесу сушіння та теплових потоків на поверхні матеріалу – здійснювали за методикою викладеною в 14, 16].

Зв'язок між теплообміном і вологообміном встановлюється за основним рівнянням кінетики процесу сушіння (2):

$$q^*(\tau) = \frac{q(\tau)}{q_N} = \left(\frac{du}{d\tau}\right)^* (1 + \mathrm{Rb}) \,, \qquad (2)$$

де $q^*(\tau)$ – відносна густина теплового потоку; $q(\tau)$ –потік тепла в періоді падаючої швидкості сушіння, кВт/м^2; q_N – потік тепла за постійної (максимальної) швидкості сушіння, кВт/м^2; $\left(\frac{du}{d\tau}\right)^* = \frac{1}{N}\left(\frac{du}{d\tau}\right)$ – відносна швидкість сушіння; $N = \left(\frac{du}{d\tau}\right)_N$ – нормувальний коефіцієнт, який визначається за постійної (максимальної) швидкості сушіння; Rb – критерій Ребіндера, який характеризує співвідношення кількості теплоти, яка витрачена на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, яка витрачена на випаровування з нього вологи, за нескінченно малий проміжок часу.

Число Ребіндера розраховується за формулою (3):

$$\mathrm{Rb} = \frac{c}{r}\left(\frac{dt}{du}\right), \qquad (3)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, *кДж/(кг · К)*; r – питома теплота випаровування вологи, *кДж/кг.*

Змінювання густини теплового потоку $q(\tau)$ на поверхні матеріалу впродовж процесу сушіння, визначається за залежністю (4), кВт/м^2:

$$q(\tau) = q^*(\tau) \cdot q_N \,, \qquad (4)$$

де q_N – густина теплового потоку в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння, визначається за (5):

$$q_N = r_N \frac{m_{a.c.}}{S}\left(\frac{du}{d\tau}\right)_N \,, \qquad (5)$$

де $m_{a.c.}$ – маса абсолютно сухого матеріалу, кг; S – площа поверхні вологого матеріалу, м^2.

Виклад основного матеріалу.

1. Визначення сорбційних та теплофізичних властивостей паренхімних тканин дині

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги одержана ізотерма сорбції пари води паренхімними тканинами дині за температури середовища 20 °С

в діапазоні відносних тисків p/p_s від 0,4 до 0,9 (рис. 2а). Ізотерма має опуклу до осі p/p_s форму, що характерно для сорбції пари води колоїдними капілярно-пористим матеріалами. Як видно з ізотерми сорбції, рівноважний вологовміст дині при p/p_s > 0,45 перевищує 0,084 кг/кг с.м. (8% відн), тому при виробництві з дині продуктів з низькою вологістю висушений матеріал необхідно упаковувати в герметичну тару для збереження заданих властивостей. При одержанні з дині продуктів з проміжною вологістю для запобігання мікробного псування вологовміст дині не повинен перевищувати 0,20 кг/кг с.м. (16,7% відн.).

Для визначення оптимальних режимів сушіння необхідно знати параметри гігротермічного рівноважного стану матеріалу з повітрям за різних температур. Використовуючи метод характеристичних кривих, що заснований на потенційній теорії сорбції [14], за одержаною при t = 20 °С ізотермою сорбції визначили максимальний гігроскопічний вологовміст паренхімних тканин дині u_{os} = 0,985 кг/кг с.м. та розрахували значення рівноважних вологовмістів в діапазоні температур від 50 до 80 °С. Слід зазначити, що ізотерми сорбції відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної вологи). У цій області тиск пари води над поверхнею матеріалу $p_м$ відрізняється від тиску насичення та залежить від вологовмісту і температури матеріалу (рис. 2б): в міру зменшення вологовмісту і при зниженні температури $p_м$ зменшується й при наближенні вологовмісту до 0,08 кг/кг с.м. стає сумірним з тиском пари води в навколишньому середовищі p_c.

З ізотерм сорбції за різних температур за рівнянням (1) одержано важливий термодинамічний параметр – чисту ізостеричну теплоту адсорбції q_a, яка вимірює енергію сил зв'язку між молекулами водяної пари та матеріалом, і яка визначається як різниця питомих витрат теплоти на випаровування води з матеріалу q і теплоти випаровування вільної води r.

На рис. 3а надана залежність чистої ізостеричної теплоти адсорбції q_a від вологовмісту паренхімних тканин дині. Як видно, теплота адсорбції поступово зростає із зменшенням вологовмісту і в області адсорбційно-зв'язаної вологи, починаючи від u = 0,25 кг/кг с.м., – різко збільшується. Таким чином, витрати енергії на десорбцію адсорбційно-зв'язаної вологи q при досягненні матеріалом вологовмісту 0,06 кг/кг с.м. збільшуються на 13% в порівнянні з теплотою випаровування вільної води r.

У реальному процесі сушіння одночасно з випаровуванням вільної та зв'язаної води в матеріалі будуть відбуватися інші як ендотермічні так і екзотермічні фізико-хімічні явища та фазові перетворення, які впливають на загальні витрати енергії на зневоднення.

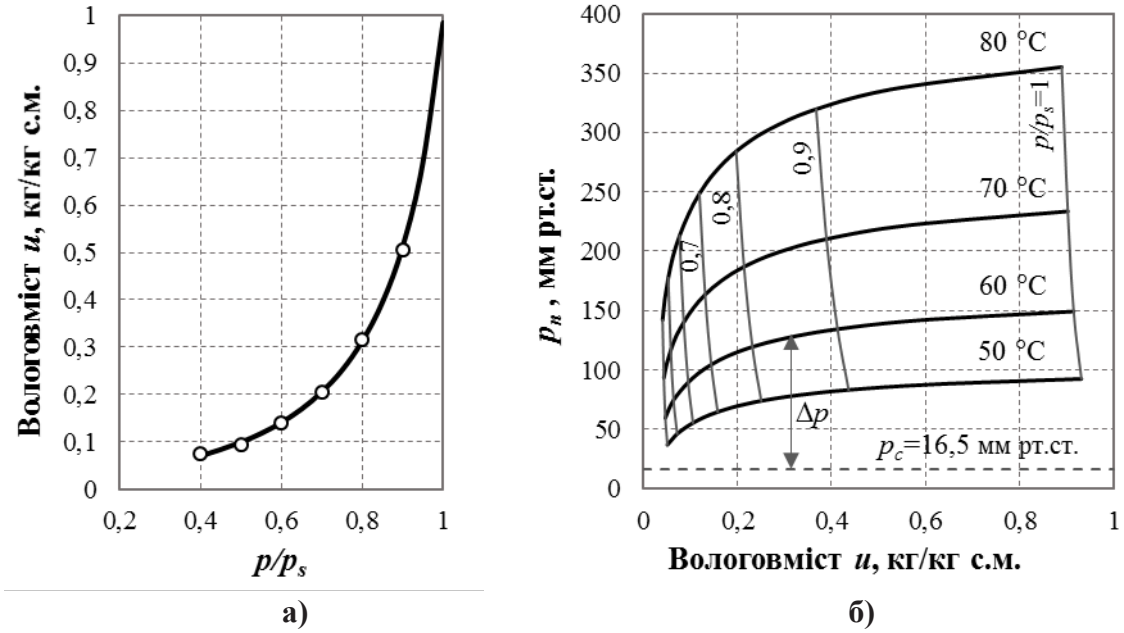


Рис. 2. Ізотерма адсорбції пари води паренхімними тканинами дині за температури 20 °С (а) та залежність парціального тиску пари води на поверхні дині від вологовмісту і температури (б)

Джерело: власні дослідження

Результати досліджень витрат теплоти на випаровування води з тканин дині в процесі сушіння опубліковані в працях [1, 5]. Як видно з наведених на рис. 3б залежностей, зі зменшенням вологовмісту експериментально одержана питома теплота випаровування води з тканин дині поступово зростає, перевищуючи відповідні табличні значення теплоти випаровування вільної води (r_{60} = 2358 кДж/кг, r_{80} = 2308 кДж/кг).

Наприкінці сушіння відбувається різке зростання значень теплоти випаровування, що відповідає класичним уявленням щодо сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Під час досліджень в діапазоні вологовмістів тканин дині 0,37…0,59 кг/кг с.м. (27…37% відн.) спостерігався піковий екзотермічний ефект, який на думку авторів [1, 5] визваний процесом кристалізації цукрів дині.

Результати експериментальних досліджень теплоємності паренхімних тканин дині в залежності від температури та ступеня їх зневоднення викладені в праці [17]. Аналіз одержаних залежностей виявив злам лінійності при досягненні матеріалом вологості $W \approx 10\%$ відн., що обумовлено деградацією спіральної структури білків при втрачанні води, та піки плавлення, що є свідченням процесу кристалізації цукрів в паренхімних тканинах дині під час зневоднення. За експериментальними даними для розрахунку питомої теплоємності паренхімних тканин дині в діапазоні вологості W = 10…85% відн. за температури t = 32,5…87,5 °С шляхом лінійної апроксимації отримана формула (6), кДж/кг·К:

$$c_p(W,t) = 1{,}2917 + 0{,}0266W + 0{,}0094t - 0{,}00008Wt \quad (6)$$

2. Дослідження процесу конвективного сушіння паренхімних тканин дині

Результати дослідження процесу конвективного сушіння паренхімних тканин дині до низького залишкового вологовмісту 0,06 кг/кг с.м. в шарі товщиною δ = 5 мм показали, що при підвищенні температури сушильного агента значно інтенсифікується вологовидалення. Так за температури сушильного агента 60 °С тривалість процесу склала близько 205 хв. (рис. 4а), а при підвищенні до 80 °С – зменшилась до 105 хв., тобто майже у 2 рази. Швидкість сушіння $du/d\tau$ (рис. 4б) в початковий момент максимальна і за температури сушильного агента 80 °С в 1,26 рази вища ніж за 60 °С.

Спільний аналіз кривих сушіння паренхімних тканин дині $u = f(\tau)$ і температурних кривих $t = f(\tau)$ показав, що після короткочасного (6–7 хв.) прогрівання матеріалу процес сушіння можна розділити на два періоди. Перший – період постійної температури t = *const*, під час якого сушіння відбувається за температури мокрого термометра на поверхні матеріалу до досягнення критичного вологовмісту $u_{кр}$. І другий – період температури t = *var*, яка підвищується з часом, наближуючись до температури сушильного агента. Тривалість першого періоду – приблизно

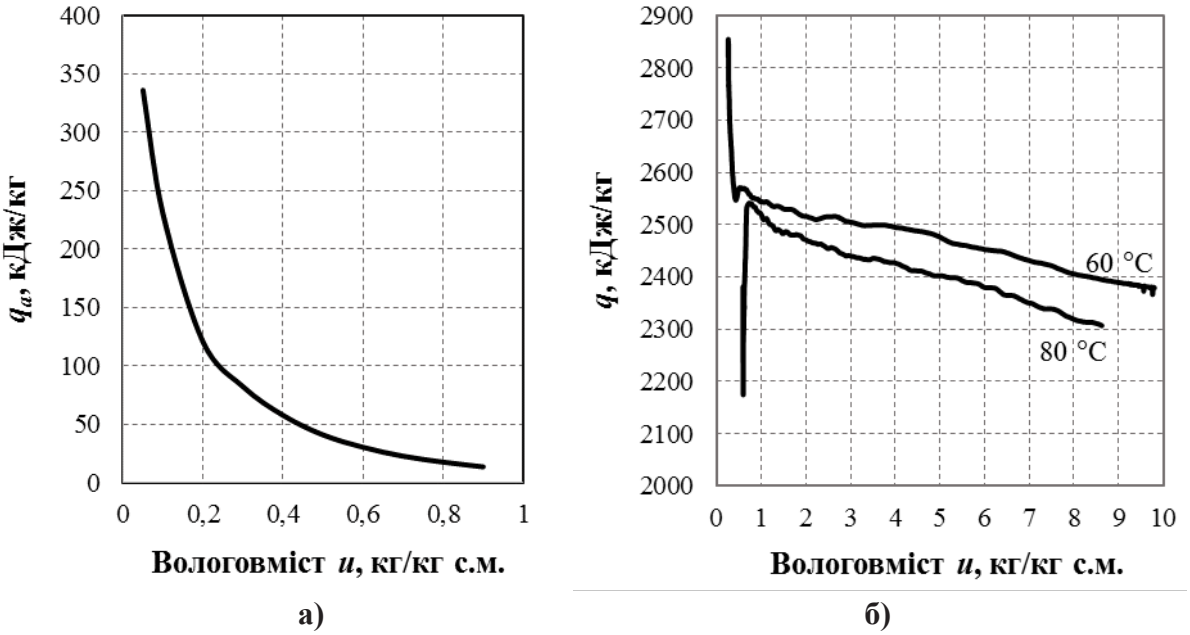


Рис. 3. Чиста ізостерична теплота адсорбції (а) та питомі витрат теплоти на сушіння (б) паренхімних тканин дині

Джерело: власні дослідження

10 хв., $u_{кр}$ становить 10,85 та 10,46 *кг/кг с.м.*, відповідно, за температур сушильного агента 60 і 80 °*C*.

Традиційно ці періоди пов'язують зі змінюванням швидкості сушіння *du/d*τ і називають, відповідно, періодом постійної та періодом падаючої швидкості. Проте в даному експерименті швидкість зневоднення паренхімних тканин дині з самого початку поступово знижується (рис. 4б). Це пояснюється тим, що рослинні матеріали сильно деформуються в процесі зневоднення, в результаті відбувається зменшення площі випаровування і, як наслідок, падіння швидкості сушіння.

Аналіз експериментальних даних змінювання температури матеріалу показав, що після першого періоду нагрівання температура паренхімних тканин дині поступово підвищується зі зменшенням вологовмісту, і при досягненні вологовмістом величини максимального гігроскопічного u_{os} (0,89 кг/кг с.м. за t = 80 °*C* *і* 0,93 кг/ кг с.м. за t = 60 °*C*) відбувається різкий підйом температури, що пов'язаний з виділенням додаткової теплоти всередині матеріалу через процес кристалізації цукрів дині, більший перепад температур тканин дині спостерегається при вищій температурі сушильного агента.

Таким чином, дослідження з кінетики сушіння узгоджуються з дослідженнями щодо визначення теплоємності й теплоти випаровування і підтверджують наявність цукрів, що дрібно закристалізувалися всередині висушеної дині. Саме вміст таких цукрів пояснює хрустку структуру чипсів, підвищення їхніх смакових якостей та терміну зберігання.

3. Дослідження тепломасообміну процесу сушіння дині до низького залишкового вологовмісту

Для оптимізації інтенсивності теплопідведення в процесі сушіння паренхімних тканин дині за встановленою залежністю $t = f(u)$ (рис. 4б), а також за експериментально визначеними питомими теплоємністю дині (формула (6)) та витратами теплоти на випаровування з неї вологи (рис. 3б) за формулою (3) розраховано змінювання критерію Ребіндера Rb для різних температурних режимів (рис. 5а). За цими даними за формулою (4) розраховане змінювання густини теплового потоку за різних температура теплоносія в залежності від вологовмісту (рис. 5б). Теплові потоки визначали за експериментально одержаними теплофізичними характеристиками (теплоємністю та теплотою випаровування), що дозволило, крім теплоти пароутворення, врахувати реальні витрати теплоти в процесі сушіння дині, а саме: теплоту руйнування зав'язків молекул води з іншими речовинами рослинної тканини і теплоту адсорбції пари води матеріалом. За одержаними величинами теплових потоків можна розрахувати

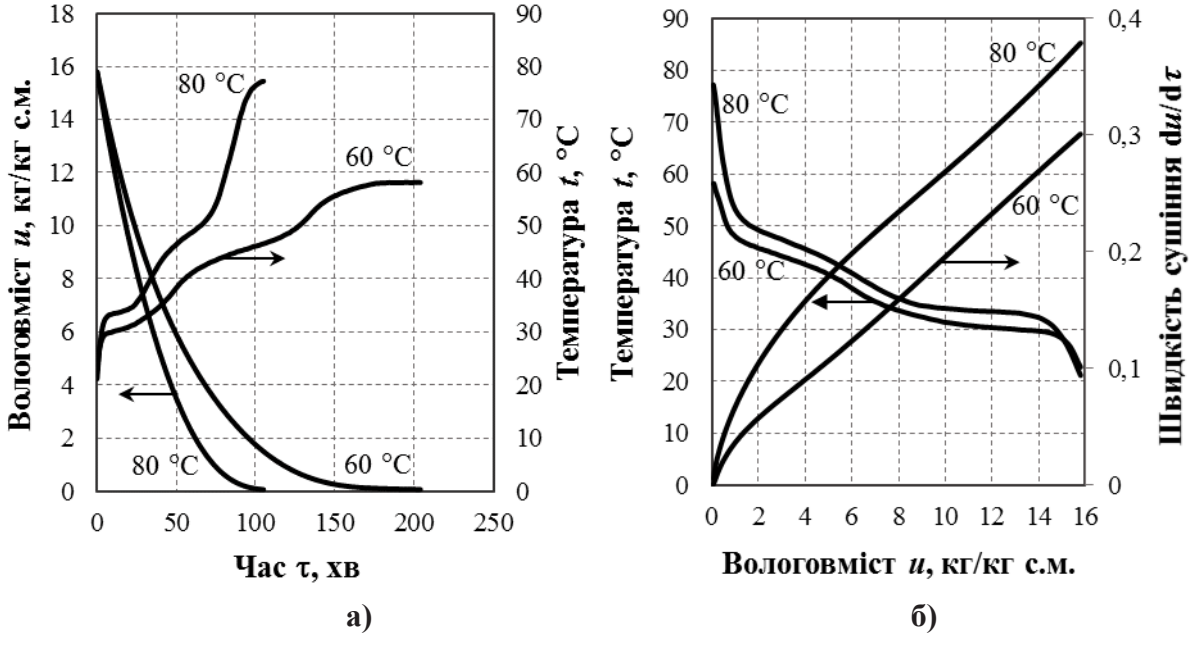


Рис. 4. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння паренхімних тканин дині (режимні параметри v = 2 м/с; d = 13 г/кг с.п., δ = 5 мм)

Джерело: власні дослідження

витрати теплоти в сушарці, які необхідні на нагрівання матеріалу та його зневоднення.

Оскільки нагрівання матеріалу за своєю сутністю є нераціональною витратою теплоти під час сушіння, бажаним є зведення величини Rb до мінімально можливого значення. Як видно з рис. 5а, на початку процесу сушіння, що відповідає періоду прогрівання матеріалу, Rb має досить великі значення. У процесі сушіння Rb зменшується до нуля – теплота витрачається переважно на випаровування вологи з матеріалу, а не на його нагрівання. При досягнені матеріалом вологовмісту 2,60 кг/кг с.м. критерій Rb різко зростає, відбувається нагрівання матеріалу, що при температурах сушіння вищих за 60 °С призводить до погіршення органолептичних показників висушеної дині. З цього моменту доцільно знижувати температуру сушильного агента не лише для більш раціонального використання енергії, але й для позитивного впливу на якість готового продукту.

На графіках (рис. 5б) бачимо, що зі зниженням вологовмісту паренхімних тканин дині теплові потоки на поверхні зменшуються і, можливо зменшити підведення енергії до сушильної камери задля більш раціонального її використання.

Проведені комплексні дослідження дозволяють розробити енергоефективну технологію сушіння дині до низького залишкового вологовмісту для одержання чипсів високої якості, особливістю якої є проведення процесу зневоднення за багатоступеневим режимом за температур сушильного агента 80/60 °С. Використання високої температури на першій стадії позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість. Обмеження використання підвищеної температури сушильного агента обумовлене гранично допустимою температурою нагріву матеріалу, яка під час сушіння дині в шарі за безперервного нагрівання не повинна перевищувати 60 °С. Тому після досягнення матеріалом температури 50 ºС (температура на поверхні наближується до 60 °С) необхідно знижувати температуру зневоднювання. Проте під час низькотемпературного сушіння до залишкового вологовмісту 0,06 кг/кг с.п. виявляється значний вплив вологовмісту сушильного агента на інтенсивність процесу. Як видно з рис. 2б, у міру зменшення вологовмісту на поверхні матеріалу зменшується рушійна сила масообміну $\Delta p = p_м - p_с$. Тому під час досушування за температури 60 °С необхідно враховувати цей фактор.

Низькотемпературне досушування запобігає небажаним змінам у паренхімних тканинах дині та руйнуванню термолабільних речовин сировини. Одержані в такий спосіб динні чипси мали природний колір та виражений смак дині, набули легкої ламкості та ніжного хрускоту, мають високу якість та здатність до збереження.

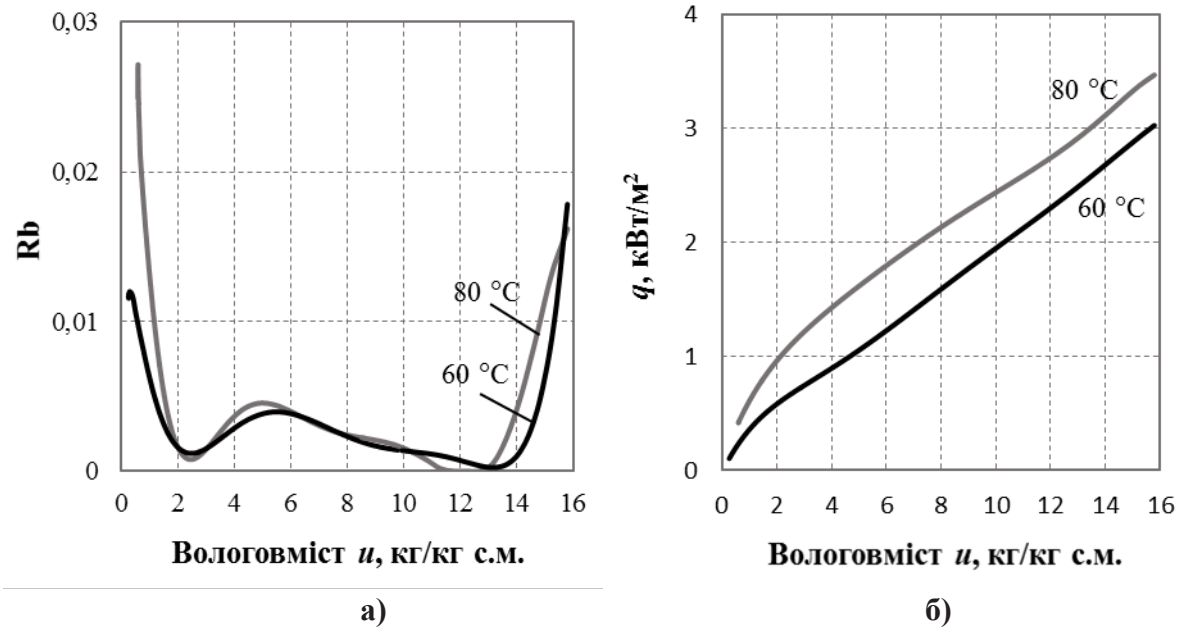


Рис. 5. Число Rb (а) та густина теплового потоку (б) в залежності від відносної вологості паренхімних тканин дині в процесі їх сушіння за різних температур сушильного агента

Джерело: власні дослідження

Висновки. На підставі проведених комплексних досліджень запропоновано використання двохстадійного режиму сушіння дині на чипси при температурі сушильного агента 80/60 °С. Використання високої температури на першій стадії сушіння позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість. Зниження температури сушильного агента до 60 ºС, після досягнення матеріалом температури 50 ºС, запобігає небажаним змінам у паренхімних тканинах дині та руйнуванню термолабільних речовин.

За експериментально визначеними питомими теплоємністю дині та витратами теплоти на випаровування з неї вологи, на підставі даних з кінетики сушіння, розраховано змінювання критерію Ребіндера Rb для різних температурних режимів. Характер кривих Rb = f (u) доводить доцільність та ефективність використання стадійних режимів сушіння. Отримані висновки калориметричних експериментів добре співпали з результатами конвективного сушіння паренхімних тканин дині.

Рекомендований двохстадійний режим сушіння дині дозволяє отримати сушений продукт високої якості. Одержані чипси мають природний колір та виражений смак дині, хрустку структуру завдяки дрібно закристалізованим цукрам.

Список літератури:

1. Снєжкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Дмитренко Н.В., Гусарова О.В. Шляхи раціонального використання рослинної сільськогосподарської продукції. *Кол. монографія: Екологоорієнтовані підходи відновлення техногеннозабруднених територій і створення сталих екосистем* / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава: ПП «Астрая», 2022. С. 394–406.
2. Пузік Л.М. Залежність хімічного складу плодів дині від особливостей сорту. *Овочівництво і баштанництво*. 2010. Вип. 56. С. 267–275. ISSN 0131-0062.
3. Dishri M., Thakur N. Melon. *In Nutraceuticals from Fruit and Vegetable Waste* (eds V. Tomer, N. Chhikara, A. Kumar and A. Panghal). 2024. https://doi.org/10.1002/9781119803980.ch14
4. Ronald M. Marsiglia, Santander E. Lastra-Ripolla, Luis D. Mieles-Gómeza, Luis A. García-Zapateiro. Physicochemical and Rheological Characterization of Melon Pulp (Cucumis melo) Cultivated in the North of Bolívar Department, Colombia. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology.* 2021. Vol. 11. No. 1. P. 185–190. ISSN: 2088-5334. https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.1.7620
5. Дмитренко Н., Шапар Р. Конвективне сушіння цукровмісних паренхімних тканин дині. *Scientific Works*. 2021. Vol 85. No 1. https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2073
6. Kolayli S., Kara M., Tezcan F., Erim F. B., Sahin H., Ulusoy E., Aliyazicioglu R. Comparative Study of Chemical and Biochemical Properties of Different Melon Cultivars: Standard, Hybrid, and Grafted Melons. *J. Agric. Food Chem*. 2010. 58. P. 9764–9769. https://doi.org/10.1021/jf102408y
7. Rakhmatov O., Rakhmatov F. O. Experimental study of the process of drying melon slices in a chamber-convection dryer. *E3S Web of Conferences.* 2023. 443. 02004. P. 1–7. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344302004
8. Снєжкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Обґрунтування режимів сушіння дині. *Енергоефективність процесів сушіння: Тематичний збірник статей* / за ред. Ю.Ф. Снєжкіна, Р.О. Шапарь. Київ: Тропеа, 2021. Т.1. С. 43–47.
9. Aktas M., Sevik S., Amini A., Khanlari A. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. *Solar Energy.* 2016. Vol. 137. P. 500–515. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.036
10. Hajimirza S., Sharifi A. Effect of two-step drying and ultrasound pretreatment on physicochemical properties of cantaloupe slices. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 2022. Vol.18. Issue 119. P. 183–192. http://fsct.modares.ac.ir/article-7-44405-en.html
11. Fernandes da Silva J.H., da Silva Neto J.S., Souza da Silva E., de Souza Cavalcanti D.E., Azoubel P.M., Benachour M. Effect of Ultrasonic Pretreatment on Melon Drying and Computational Fluid Dynamic Modelling of Thermal Profile. *Food Technology and Biotechnolo*gy. 2020. 58 (4). P. 1–23. https://doi.org/10.17113/ftb.58.04.20.6813
12. Valdiviezo-Seminario C.S., Sánchez-Chero M.J., Flores-Mendoza L.C. Effect of osmotic dehydration pretreatment on melon (cucumis melo) drying time. *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2024, Vol. 12, No. (3), P. 1421–1432. https://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.12.3.34
13. Fabiano A.N. Fernandesa, Maria Izabel Gallao, Sueli Rodriguesc. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *F.A.N. Fernandes et al. LWT* 2008. Vol. 41. P. 604–610. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.007
14. Дабіжа Н.О. Інтенсифікація процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту: дис. … канд. техн. наук: 05.14.06. Київ: *ІТТФ НАН України*. 2013. 208 с.

15. Гусарова О.В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук: дис...канд. техн. наук.: 05.14.06. Київ: *ІТТФ НАН України.* 2020. 241 с.

16. Дмитренко Н., Іванов С., Дабіжа Н. Теплофізичні властивості насіння дині та тепломасообмін в процесі його сушіння. *Scientific Works.* 2024. 88 (1). С. 11–18. https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2954

17. Дмитренко Н.В., Іванов С.О. Вплив температури та зневоднювання на питому теплоємність паренхімних тканин дині. *Матеріали конференцій МЦНД*, (22.11.2024; Біла Церква, Україна). 2024. С. 273–276. https://doi.org/10.62731/mcnd-22.11.2024.001

Dmytrenko N.V., Dabizha N.O., Husarova O.V., Malashchuk N.S., Husarov V.M.

HEAT AND MASS TRANSFER OF MELON DRYING TO A LOW RESIDUAL MOISTURE CONTENT

The article is devoted to the study of heat and mass transfer in the process of drying melon to a low residual moisture content. Taking into account the short shelf life of fresh melon and the need for waste disposal, drying is an effective method of processing. The presence of thermolabile substances in the composition limits the intensification of drying by increasing the temperature, and prolonged thermal exposure causes the destruction of vitamins, caramelisation of sugars and the formation of melanoids.

The purpose of the article is to determine the regularities of heat and mass transfer during melon dehydration for the development of convective drying regimes to low residual moisture. The modes should ensure minimisation of energy consumption, as well as preservation of the natural composition of melon and high product quality.

The sorption and thermophysical properties of the parenchymal tissues of the melon were determined. It was found that the energy consumption for the desorption of bound moisture increases with decreasing moisture content. A peak exothermic effect in the range of moisture contents of 0.37...0.59 kg/kg dry basic was found, which is probably associated with the crystallisation of melon sugars. It is the sugar content that explains the crispy structure of the crisps, their improved taste and shelf life.

The calculation of the Rebinder criterion (Rb) showed that at the beginning of the drying process, a significant part of the energy is spent on heating the material, and its sharp increase at a moisture content of 2.60 kg/kg dry basic indicates the expediency of reducing the temperature of the drying agent for the rational use of energy and preservation of product quality.

On the basis of comprehensive studies, a two-stage melon drying regime of 80/60 °C was proposed. The use of a high temperature of 80 °C at the first stage intensifies the dehydration process, and its reduction to 60 °C at the second stage, after the material reaches a temperature of 50 °C, prevents undesirable changes in melon tissue and the destruction of thermolabile substances. The developed mode allows to produce melon chips with natural colour and taste, light brittleness and delicate crunch.

Key words: *melon, chips, thermophysical, sorption properties, convective drying, Rebinder criterion, energy efficiency.*

УДК 664.1.633.61/66
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/40

Сірко З.С.
Державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Ващенко В.В.
Державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Овчаренко А.О.
Державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Костенко О.І.
Державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Грицун В.М.
Державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

ВПЛИВ ФЕРМЕНТНОГО ПРЕПАРАТУ LAMINEX-750 НА ДЕСТРУКЦІЮ НЕЦУКРІВ БУРЯКОВОГО СОКУ

У статті висвітлені питання, пов'язані із корисним та якісним виходом цукру із бурякової сировини. Зокрема акцентується увага, на вмісті нецукрів, які заважають кристалізації сахарози і збільшують втрати цукрози в мелясі. Нецукри здатні перешкоджати проведенню технологічних операцій. Вони викликають сильне спінювання бурякового соку, напівпродуктів і, навіть, розчинів цукру. Нецукри є активними сполуками та вносять похибку під час визначення вмісту сахарози. В роботі досліджувався вплив ферментних препаратів на деструкцію нецукрів бурякового соку. Предмет дослідження – вплив ферментних препаратів на деструкцію нецукрів бурякового соку. Мета дослідження – визначити вплив ферментних препаратів на деструкцію нецукрів бурякового соку. В роботі застосовані фізико-хімічні методи досліджень. Цукрові буряки були відібрані в зонах бурякосіяння Вінницької області. Дослідження проводились з використанням установки для визначення піноутворюючої здатності. Зазначено, що на сьогоднішній день є досвід використання ферментних препаратів у цукровій промисловості, які орієнтовані, в основному, на деструкцію декстрину. Авторами запропоновано ферментний препарат – целюлолітичний фермент LAMINEX-750, дія якого направлена на деструкцію не лише декстрину, а й інших шкідливих нецукрів (некрохмальні полісахариди та сапонін). Експериментально була встановлена ефективна концентрація ферментного препарату на одну тону цукрових буряків. Отримана характеристики піно дифузійного соку від тривалості оброблення ферментним препаратом. Проаналізована дія ферментного препарату на зниження вмісту пектинових речовин, сапоніну та декстрину. Наведено фізико-хімічні показники дифузійного соку з додаванням препарату LAMINEX-750. Показано, що під час використання запропонованого ферментного препарату підвищується чистота дифузійного соку, що позитивно впливає на технологічні процеси карбонізації та фільтрування. Це дозволяє отримати готову продукцію високої якості, а також знизити витрату додаткових хімічних речовин, зокрема піногасників.

Ключові слова: *дифузійний буряковий сік, вміст нецукрів, ферментний препарат LAMINEX-750, деструкція декстрину, некрохмальних полісахарів та сапоніну, тривалість оброблення ферментним препаратом, фізико-хімічні показники дифузійного соку із вмістом ферментного препарату.*

Постановка проблеми. Незважаючи на численні рекомендації дієтологів, щодо обмеження вживання цукру, він залишається незмінним продуктом в раціоні харчування людини.

Цукор складається з вуглеводів, які досить швидко перетворюються на енергію. Інвертована глюкоза живить мозок, а солодкий смак сприяє створенню відчуття спокою і щастя. Цукор може зберігатися протягом тривалого терміну практично без змін споживчих властивостей і не потребує спеціальних умов зберігання.

Цукор включено до номенклатури державного матеріального резерву, оскільки його висока енергетична цінність (398 ккал на 100 г) робить

його необхідним для людей, які опинились в умовах надзвичайних ситуацій або воєнного конфлікту.

Виробництво цукру здійснюється відповідно до нового галузевого стандарту якості ДСТУ 4623:2023 «Цукор. Технічні умови», який повністю гармонізований з вимогами Європейського Союзу. Уніфікація стандартів сприятиме спрощенню експортних процедур у майбутньому та мінімізує кількість регуляторних і технічних бар'єрів, що виникали раніше.

Цукор є органічним продуктом, фізико-хімічні та органолептичні характеристики якого значною мірою залежать від якості сировини. На його властивості впливають такі фактори, як ступінь технологічної стиглості вихідного матеріалу, наявність механічних пошкоджень, рівень мікробіологічного забруднення (бактеріального та мікологічного), а також вплив низьких температур, зокрема підмороження. Ці чинники можуть спричиняти зміни в кристалічній структурі цукру, зниження виходу готової продукції та погіршення її зберігання.

У результаті кінцева продукція не завжди відповідає високим стандартам якості, оскільки може містити бактеріальну контамінацію та певну кількість нецукристих домішок. Під час зберігання недостатньо очищеного цукру відбуваються органічні перетворення, які негативно впливають на його якість, зокрема сприяють підвищенню кольоровості та зниженню вмісту сахарози. Останнє може бути зумовлене процесами інверсії, що інтенсифікуються за умов підвищеної вологості. Такі зміни знижують технологічну цінність продукту та можуть обмежувати його подальше використання у харчовій промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У цукровій промисловості застосовуються наступні критерії для оцінки якості буряків: візуальні, аналітичні, технологічні та розрахункові [1–6].

З метою прогнозування впливу складу нецукрів було введено поняття «чистий вихід» сахарози на відміну від фактичного виходу. Для розрахунку «чистого виходу» сахарози для заводів країн Західної Європи втрати у виробництві були прийняті 0,6% до маси буряків. Фактичні втрати цукру під час перероблення змінюються від 0,5 до 1,2% до маси перероблених буряків [7, 8].

Наявність спороутворюючих бактерій в дифузійному соку сприяє утворенню інвертного цукру, нітритів і газів, накопичення органічних кислот, близько 95% яких становить молочна кислота. Розвиваючись в жорстких умовах процесу дифузії, спорові бактерії пристосовуються до підвищених температур та утворюють стійку біоплівку [9–11].

Велика частина використовуваних в промисловості биоцидів спрямовані на пригнічення зростання і знищення планктонних форм мікроорганізмів.

Стратегії впливу на біоплівки в основному спрямовані на поліпшення відкріплення її від поверхні, ослаблення структури та поліпшення проникнення біоциду до мікроорганізмів [12–17].

На сьогоднішній день у цукровій промисловості використовуються ферменти [18], які в основному орієнтовані на деструкцію декстрину.

Зважаючи на ключову роль очищення дифузійного соку від нецукристих домішок у забезпеченні якості цукровмісної сировини, актуальним є дослідження впливу ферментних препаратів на процеси їхньої деструкції.

Постановка завдання. Метою статті є встановлення закономірностей впливу ферментного препарату на руйнування нецукристих компонентів бурякового соку з метою підвищення ефективності його очищення та оптимізації технологічного процесу виробництва цукру.

Виклад основного матеріалу. У дослідженні використано фізико-хімічні методи аналізу, проведені відповідно до сучасних уніфікованих європейських методик ICUMSA. Експериментальні дані піддавалися статистичній обробці для забезпечення їхньої достовірності та відтворюваності. Визначено фізико-хімічні характеристики цукрових буряків, зразки яких були відібрані в бурякосійних регіонах Вінницької області, зокрема на базі Крижопільського цукрового заводу.

Дослідження впливу ферментних препаратів на процес деструкції нецукристих домішок проводилося в лабораторних умовах Інституту продовольчих ресурсів НАН України із застосуванням спеціально розробленої та виготовленої експериментальної установки, призначеної для оцінювання піноутворюючої здатності дифузійного соку.

Дослідження піноутворюючої здатності проводили наступним чином. Повітряний компресор активували та за допомогою витратоміра й регулятора встановлювали однаковий потік повітря. У циліндр із барботером вводили фіксовану кількість дифузійного соку, попередньо обробленого ферментним препаратом. Висоту утвореної піни

вимірювали за допомогою лінійки. Усі експерименти виконували у порівнянні з контрольним зразком (необробленим дифузійним соком). Піноутворюючу здатність визначали відповідно до методики Лур'є.

За використанням установки з циліндричною трубкою, що забезпечує пневматичні збурення соку, піноутворюючу здатність визначали за наступною формулою:

$$ПЗ = \frac{V_n}{V_p}, \%, \quad (1)$$

де Vn – об'єм піни, м^3;
Vp – об'єм соку до пневматичного збурення (взбивання), м^3.

Об'єм піни, за умови проведення дослідження у циліндричній трубці визначали з формули:

$$V = \pi \bullet r^2 \bullet h, \quad (2)$$

де r – радіус циліндра, м;
h – висота циліндра, м.

Чистоту дифузійного соку розраховували за формулою:

$$Ч = \frac{Ц_к}{СР}, (\text{безрозмірна величина}) \quad (3)$$

де $Цк$ – вміст сахарози у дифузійному соку, %
$СР$ – вміст сухих речовин у дифузійному соку, %.

Для досліджень було використано зразки дифузійного соку, отримані безпосередньо в умовах виробництва, які попередньо були законсервовані. Перед початком експериментальних процедур сік був приведений до технологічних показників, характерних для виробничого процесу.

Сучасний досвід використання ферментних препаратів у цукровій промисловості свідчить про їхню ефективність. Зокрема, при переробці цукрових буряків, уражених слизистим бактеріозом, застосовується фермент декстраназа, орієнтований на розщеплення декстрину та левану до моносахаридної форми – глюкози.

Для експерименту було обрано целюлолітичний фермент LAMINEX-750, дія якого полягає у руйнуванні α-1,4 та α-1,6 глікозидних зв'язків. Наукову увагу було зосереджено на некрохмальних полісахаридах та сапонінах.

Робочий розчин ферментного препарату LAMINEX-750 комплексної дії готували шляхом розчинення його у воді у спеціально відведеному та промаркованому хімічному посуді.

Експериментальне дослідження встановило, що ефективна концентрація ферментного препарату LAMINEX-750 становить 0,03–0,08 кг на 1 тону цукрових буряків. У цьому діапазоні препарат забезпечує розкладання сапонінів, декстрану та пектинових сполук. Приготовані робочі водні розчини характеризуються високою прозорістю, слабким запахом, стабільністю та зберігають активність протягом 14 днів при зберіганні в закритих ємностях.

Першим індикатором ефективності дії ферменту є руйнування глікозидних зв'язків сапонінів, що виражається у зниженні пінення обробленого дифузійного соку, особливо при інтенсивному перемішуванні.

Дифузійний сік та зразки, оброблені ферментним препаратом LAMINEX-750, оброблялися на лабораторній установці шляхом барботування повітря через шар рідини. Штучне пінення проводилося з метою визначення висоти утвореного шару піни, її структурних характеристик та швидкості руйнування.

Отримані характеристики піни для різних методів обробки ферментним препаратом наведені у таблицях 1 та 2.

Під час додавання ферментного препарату LAMINEX-750 у всіх дослідних зразках спостерігалося часткове руйнування піни протягом встановленого проміжку часу, що свідчить про розривання полімерних ланцюгів молекул шкідливих нецукристих компонентів.

Під час додавання ферментного препарату LAMINEX-750 у всіх дослідних зразках спостерігалося часткове руйнування піни протягом встановленого проміжку часу, що свідчить про розривання полімерних ланцюгів молекул шкідливих нецукристих компонентів. Для підтвердження дії ферменту на деструкцію нецукристих речовин у дифузійному соку було проведено додаткові фізико-хімічні дослідження (результати наведено у таблиці 3).

Аналіз отриманих даних вказує на позитивний вплив ферментного препарату, що проявився у зниженні вмісту пектинових речовин на 20,8%, сапоніну на 28,6% та декстрану на 37,7%.

Застосування ферментного препарату спричиняє підвищення чистоти дифузійного соку більше ніж на 1,5 одиниці, що позитивно впливає на ефективність технологічних процесів, зокрема вапнокарбонізації та фільтрації. Цей комплекс факторів сприятиме отриманню готової продукції високої якості та дозволить знизити витрати на додаткові хімічні реагенти, зокрема піногасники, які частково накопичуються у кінцевому продукті та мелясі.

Таблиця 1

Показники стійкості піни дифузійного соку від тривалості оброблення ферментним препаратом

№ з/ п	Час оброблення, хв.	Показники піни			Піноутворююча здатність соку, %	Індикація глікозидів тритерпенового ряду
		Висота, м	Об'єм, $м^3$	Час руйнування, с		
1	5–10	0,28	0,014	36	70	+ рожевий колір
2	15–20	0,22	0,012	24	60	- колір прозорий
3	25–30	0,20	0,011	12	55	- колір прозорий

Таблиця 2

Залежність показників стійкості піни дифузійного соку від кількості ферментного препарату

№ з/ п	Витрати препарату LAMINEX 750, кг на 1т цукрових буряків	Показники піни			Піноутворююча здатність соку, %	Індикація глікозидів тритерпенового ряду
		Висота, м	Об'єм, $м^3$	Час руйнування, с		
1	Дифузійний сік без додавання ферментного препарату	1,0	0,049	230	245	+ червонорожевий колір
2	Витрати 0,020–0,025	0,82	0,040	54	200	+ червонорожевий колір
3	Витрати 0,03–0,08	0,22	0,012	24	60	+ червонорожевий колір
4	Витрати 0,10–0,15	0,18	0,009	21	45	- прозорий колір

Таблиця 3

Фізико-хімічні показники дифузійного бурякового соку

№ з/п	Показники	Необроблений дифузійний сік	Дифузійний сік з доданим препаратом «LAMINEX-750» (з концентрацією 0,03- 0,08 кг на 1 т цукрових буряків)
1	Тривалість оброблення, хв	20	20
2	Температура, ºС	40	40
3	Показник pH	6,5±0,2	6,6±0,2
4	Вміст сахарози,%	8,16±0,2	8,16±0,2
5	Вміст сухих речовин,%	10,2±0,2	10,0±0,2

Деактивація ферментного препарату LAMINEX-750 відбувається під час технологічних процесів, за умов високих температур (понад 85°С) та високої лужності (pH ≥ 9).

Під час визначення впливу ферментного препарату LAMINEX-750 на ряд нецукрів дифузійного соку цукробурякового виробництва спостерігається можливість суттєвого зниження витрат піногасника, який застосовують у технологічному процесі виробництва та який частково залишається у напівфабрикатах і утримує частину сахарози від ви кристалізації та накопичується в мелясі, що негативно впливає на її якість.

Також можна констатувати, що за рахунок дії ферментного препарату LAMINEX-750 на глікозидний ланцюг нецукрів (сапоніну, декстрину, пектинових речовин) шляхом їх часткової деструкції можна значно підвищити якість напівпродуктів цукрового виробництва та якість готової продукції загалом і покращити ведення технологічного процесу цукробурякового виробництва.

Висновки. 1. Досліджено вплив ферментного препарату LAMINEX-750 на склад та вміст нецукристих компонентів у дифузійному соці, що утворюється в процесі переробки цукрових буряків.

2. Встановлено залежність фізико-хімічних характеристик дифузійного соку від тривалості обробки ферментним препаратом та його дозування.

3. Визначено фізико-хімічні параметри дифузійного соку за умов застосування ферментного препарату.

4. Доведено, що шляхом впливу ферментного препарату на глікозидні зв'язки нецукристих сполук, що спричиняє їх часткову деструкцію, можна покращити якість кінцевого продукту та оптимізувати технологічний процес виробництва.

Список літератури:

1. Положенець В.М., Роїк М.В., Станкевич С.В., Немерицька Л.В., Журавка І.А. Інтегрований захист цукрових буряків від хвороб, шкідників і бур'янів: Навчальний посібник. Житомир: Рута, 2022. 371 с.
2. Прийдяк Т.Б. Стратегія розвитку та підвищення ефективності бурякоцукрового виробництва: дис. канд. екон. наук: 08.00.03. Полтава, 2016. 198 с.
3. Присяжнюк О.І., Шульга С.С. Формування продуктивності та технологічної якості буряків. Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків в умовах континентального клімату. 2022. Вип 30. 79–95. DOI:http://doi.org./10.47414/np.30.2022.269736
4. Ярчук М.М., Роїк М.В. Буряки й цукор: Нові завдання і пріоритети галузі. Цукрові буряки. 2011. № 2. С. 4–6.
5. Дубчак О.В. Вивчення та добір селекційно цінних ЧС ліній цукрових буряків для одержання пробних гібридів. Агробіологія. 2020. № 1. С. 42–48.
6. Войтовська В.І., Сторожик Л.І., Зінченко О.А., Рогальський С.В., Кулик Г.А. Хімічний складник коренеплодів буряків цукрових і кормових залежно від способу їх відтворення. Таврійський науковий вісник. № 110. част. 1 С. 31–39. DOI: http://doi.org./10.32851/2226-0099.2019.110-1.5
7. Вплив умов зберігання цукрових буряків на вилучення та втрати цукру, чистого соку. 2023. URL: http://www.ukrsugar.com (дата звернення 18.03.2025)
8. Вплив збільшення тривалості переробного сезону на вміст цукру у буряках. 2019. URL: http://www.ukrsugar.com (дата звернення 18.03.2025)
9. Шейко Т. В. Ткаченко С. В., Хомічак Л. М., Олійнічук С. Т., Заіка Ю. І. Шляхи вирішення проблеми пінення напівпродуктів цукрового виробництва// XI Всеукраїнська конференція молодих вчених «Молоді вчені 2020 – від теорії до практики» 12 березня 2020 р., Україна, м. Дніпро, С. 87–92.
10. Zheplinska M., Mushtruk M., Kos T., Vasyliv V., Kryzhova Yu., Mukoid R., Bilko M., Kuts A., Kambulova Yu., Gunko S. The influence of cavitation effects on the purification processes of beet sugar production Juices. Potravinarstvo, Slovak journal of food sciences. 2020. Vol. 14. P. 451–457. DOI: https://doi.org/10.5219/1284.
11. Ridout C., Price K. R., Parkin G., et al. Saponins from sugar beet and the floc problem. Journal of Agricultural and Food Chemistry. American Chemical Society. USA. 1994. Feb № 1. P. 279–286. DOI: https://doi.org/10.1021/jf00038a010.
12. Хомічак Л. М., Шейко Т. В., Ткаченко С. В. Аналіз і порівняльна характеристика антисептичних засобів цукробурякового виробництва. Продовольчі ресурси. 2020, № 14, С. 204–210. DOI: https://doi.org/10.31073/foodresources2020-14-21.
13. Sheres Z., Maravic N., Rakic D., Dokic L., Nikolic I., Sorona-Simovic D., Djordjevic M. Application of biocides in the process of sucrose extraction from sugar beet: Effect on sucrose content, number of Leuconostoc colonies and wet pulp characteristics. University of Novi Sad, Faculty of Technology. Novi Sad, Serbia. 2017. Volume 75. 1 January. P. 17–24. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.038.
14. Gorodecky V. O., Semenikhin S. O., Daisheva N. M., Kotlyarevskaya N. I., Babakina M. V. The influence of extractant preparation methods on the microbiological contamination of intermediate products of sugar beet raw juice obtaining station Ecology. Environment and Conservation. 2019. Volume 25. Issue 3. P. 472–476.
15. Шейко Т. В. Вплив мікробіологічної біоплівки на технологічний процес цукрового виробництва. Продовольчі ресурси. 2021. № 16. С. 221–228. DOI: https://doi.org/10.31073/foodresources2021-16-21.
16. Jensen P. S., Davis S. B. Direct clear juice – The production of clear juice in a sugarcane diffuser at Maidstone factory. International Sugar Journal. 2015. Volume 117, Issue 1397, May. https://internationalsugarjournal.com/paper/direct-clear-juice-the-production-ofclear-juice-in-a-sugarcane-diffuser-at-maidstone-factory/.
17. Khangholi M. , Jamalli A. The Effects of Sugars on the Biofilm Formation of Escherichia coli 185p on Stainless Steel and Polyethylene Terephthalate Surfaces in a Laboratory Model. Jundishapur J Microbiol. National Center for Biotechnology Information, Bethesda MD. USA. 2016 Sep; 9 (9): e40137. DOI: https://doi.org/10.5812/jjm.40137.
18. Дубініна А.А., Хацкевич Ю.М., Попова Т.М., Ленерт С.О. Загальна технологія харчових виробництв: навчальний посібник. Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі, 2016. 497 с.

Sirko Z.S., Vashchenko V.V., Ovcharenko A.O., Kostenko O.I., Gritsun V.M. INFLUENCE OF ENZYME PREPARATIONS ON THE DESTRUCTION OF NON-SUGARS IN BEET JUICE

The article highlights issues related to the efficient and high-quality yield of sugar from beet raw materials. In particular, attention is focused on the content of non-sugars, which hinder sucrose crystallization and increase sucrose losses in molasses. Non-sugars can impede technological operations. They cause strong foaming of beet juice, intermediate products, and even sugar solutions. Non-sugars are active compounds

and introduce errors during the determination of sucrose content. The study investigated the effect of enzyme preparations on the destruction of non-sugars in beet juice. The subject of the research is the influence of enzyme preparations on the destruction of non-sugars in beet juice. The aim of the research is to determine the effect of enzyme preparations on the destruction of non-sugars in beet juice. Physicochemical research methods were used in the work. Sugar beets were selected from the beet-growing areas of Vinnytsia region. The studies were carried out using an installation for determining foaming ability. It is noted that to date, there is experience in using enzyme preparations in the sugar industry, which are mainly focused on the destruction of dextran. The authors proposed an enzyme preparation – the cellulolytic enzyme LAMINEX-750, the action of which is directed at the destruction of not only dextran, but also other harmful non-sugars (non-starch polysaccharides and saponin). The effective concentration of the enzyme preparation per ton of sugar beets was experimentally established. The characteristics of the diffusion juice foam depending on the duration of treatment with the enzyme preparation were obtained. The effect of the enzyme preparation on reducing the content of pectic substances, saponin, and dextran was analyzed. The physicochemical parameters of diffusion juice with the addition of LAMINEX-750 are presented. It is shown that the use of the proposed enzyme preparation increases the purity of the diffusion juice, which positively affects the technological processes of carbonation and filtration. This makes it possible to obtain high-quality finished products, as well as reduce the consumption of additional chemicals, in particular antifoaming agents.

Key words: *diffusion beet juice, non-sugar content, enzyme preparation LAMINEX-750, dextrin destruction, non-starch polysaccharides and saponin, duration of enzyme preparation treatment, physical and chemical parameters of diffusion juice with enzyme preparation content.*

УДК 621.1:664:62-5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/41

Скуйбіда Є.Л.
Національний університет харчових технологій

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Проблема енергоефективності в харчовій промисловості набула особливої актуальності у зв'язку з підвищенням вартості енергоносіїв, посиленням екологічних вимог та необхідністю впровадження сталих виробничих підходів. У дослідженні розглянуто напрямок підвищення енергоефективності технологічного обладнання харчових виробництв шляхом оптимізації перехідних процесів – динамічних режимів, які супроводжують запуск, зупинку або перехід на інші технологічні параметри. Значну частину енергетичних витрат на виробництві формують саме перехідні процеси, які часто ігноруються при плануванні режимів роботи, що призводить до зайвих витрат і зниження ресурсу обладнання. У межах дослідження проаналізовано типові перехідні процеси, що виникають у теплотехнічному та механічному обладнанні різного призначення. Проведено математичне моделювання їх перебігу з урахуванням теплофізичних, кінематичних та інерційних характеристик, які впливають на стабільність і точність керування. Окрему увагу приділено реалізації частотного регулювання обертів електроприводів, застосуванню адаптивних систем керування, модульних рішень для автоматизації та впровадженню систем моніторингу технічного стану агрегатів у реальному часі. На основі отриманих експериментальних і модельних результатів підтверджено ефективність впроваджених рішень: середнє зниження енергоспоживання в перехідних режимах становило 24,7–28,2 %, пікові струмові навантаження зменшено до 53 %, вібраційне навантаження – до 31 %, а температурні перевантаження – на 16–22 %. Оптимізація перехідних процесів сприяла подовженню ресурсу обладнання: електродвигунів – на 19 %, підшипникових вузлів – до 26 %, теплообмінних елементів – на 17 %, що досягнуто без втрат стабільності чи якості виробничого процесу. У підсумку запропоновано практичні рекомендації для впровадження оптимізованих алгоритмів керування у виробничих умовах. Матеріали статті можуть бути використані для модернізації існуючих виробничих ліній, проєктування нових енергоощадних технологічних систем і формування політики енергоменеджменту на підприємствах харчової галузі.

Ключові слова: *енергоефективність, харчова промисловість, перехідні процеси, частотне регулювання, математичне моделювання, ресурс обладнання, адаптивне керування, рекуперація.*

Постановка проблеми. Однією з ключових тем сучасної харчової промисловості є підвищення енергоефективності технологічного обладнання, особливо з урахуванням сучасних викликів енергетичної безпеки та необхідності переходу до сталих моделей виробництва. Підприємства харчової галузі дедалі активніше впроваджують технічні рішення, що дозволяють зменшити споживання енергії, знизити втрати у виробничих процесах та оптимізувати роботу основного й допоміжного обладнання. Все більше виробників розуміють необхідність переходу до енергоощадних технологій, які не лише відповідають міжнародним екологічним стандартам, а й дозволяють зменшити собівартість продукції.

Особливу увагу сучасні інженери та технологи приділяють перехідним процесам, які супроводжують зміну режимів роботи устаткування – запуск, зупинку, переключення між технологічними етапами. Саме ці динамічні режими найчастіше є джерелом надмірних енергетичних витрат, вібрацій, теплових перевантажень, що негативно впливає як на загальну ефективність виробництва, так і на ресурс роботи обладнання. Однак ця тема й досі лишається недостатньо дослідженою в контексті системного енергоменеджменту підприємств харчової промисловості.

Тому питання оптимізації перехідних процесів і впровадження енергоощадних алгоритмів керування роботою обладнання є не лише актуальним, а й надзвичайно перспективним напрямом інженерних розробок у сфері харчових технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом питання енергоефективності

у харчовій промисловості набуло особливої актуальності. Підвищення вартості енергоносіїв, посилення вимог до сталого виробництва та загальносвітовий тренд на енергозбереження змушують підприємства переосмислювати підходи до експлуатації технологічного обладнання. Все частіше звучить думка про необхідність не лише заміни застарілих агрегатів, а й глибшого аналізу процесів, які відбуваються під час роботи вже наявних машин.

У фокусі сучасних досліджень – оптимізація енергоспоживання не лише в сталих, а й у перехідних режимах. Саме ці режими, що виникають під час запуску, зупинки чи зміни параметрів обладнання, часто залишаються поза увагою, хоча насправді можуть формувати до 30 % від загального обсягу витрат енергії. Саме тому сьогодні дослідники все частіше звертаються до теми математичного моделювання динаміки машин, адаптивного керування, частотного регулювання та впровадження цифрових технологій моніторингу [1–3].

Використання інструментів цифрового моделювання, зокрема концепції цифрового двійника (xDT), дозволяє не тільки візуалізувати роботу технологічного обладнання, а й прораховувати його поведінку в реальному часі, враховуючи теплові, інерційні та кінематичні властивості [2]. Поряд з цим, у закордонній науковій літературі активно вивчаються методи зменшення енерговтрат під час термічної обробки, сушіння, охолодження та транспортування продуктів [4–5]. Увагу приділено також застосуванню енергоощадних технологій, які зменшують не лише витрати енергії, а й втрати поживних речовин у продуктах.

Актуальною темою сьогодення в галузі харчової промисловості є впровадження енергоощадних рішень на рівні технологічного обладнання. Незважаючи на помітний прогрес у цій галузі, в українському виробничому середовищі ще не склалася система, яка б повною мірою враховувала енергоспоживання саме в перехідних режимах. Тому нині важливо не лише адаптувати існуючі міжнародні підходи, а й створити власні ефективні рішення, з урахуванням специфіки українських підприємств.

Постановка завдання. Метою даної роботи є створення інженерно обґрунтованих підходів до підвищення енергоефективності обладнання харчових виробництв шляхом оптимізації перехідних процесів. Додаткову увагу приділено частотному регулюванню, цифровому керуванню, адаптивним алгоритмам та моніторингу технічного стану агрегатів у реальному часі.

Матеріали і методи дослідження. У дослідженні використано дані експлуатації обладнання харчових виробництв – мішалок, насосів і теплових апаратів. Аналіз перехідних процесів здійснено на основі математичного моделювання з використанням *MATLAB Simulink* та *Mathcad*. Енерговитрати в динамічних режимах визначалися за показниками струму, моменту та температури. Застосовувалися частотні перетворювачі *Schneider Altivar* для адаптивного регулювання. Моніторинг технічного стану проводили за допомогою термодатчиків і енергометрів *Energomera*. Ефективність визначали за зниженням енергоспоживання, тривалістю перехідних режимів та навантаженням на вузли.

Виклад основного матеріалу. У сучасному виробництві харчової продукції технологічне обладнання працює не лише в сталих, а й у динамічних режимах, що виникають при його запуску, зупинці чи зміні технологічних параметрів. Саме ці перехідні процеси супроводжуються суттєвими енерговитратами, які в умовах зростання цін на енергоносії та екологічних вимог не можна ігнорувати. Метою першого етапу дослідження було моделювання та аналіз параметрів перехідних процесів для типового обладнання харчових виробництв – насосів, мішалок і теплових апаратів – з метою виявлення їхнього впливу на загальну енергоефективність виробничих ліній.

На основі даних, отриманих із промислових об’єктів, було змодельовано поведінку струму, моменту та температури під час запуску обладнання. Результати подано на рисунку 1, де зображено динаміку споживаного струму насосним агрегатом.

Як видно з графіка 1, на старті виникає короткочасний пік споживання, який перевищує номінальне значення у 2–3 рази. Саме в цей момент електродвигун перебуває під максимальним навантаженням, що створює високий пусковий момент та теплове перевантаження обмоток. За відсутності регулювання це призводить до підвищеного зношування та значних енергетичних втрат [6; 8].

Аналогічні явища спостерігаються в роботі мішалок, особливо тих, що обслуговують в’язкі маси. На рисунку 2 наведено графік порівняння моменту інерції обертання ротора у випадках різної маси навантаження.

При зростанні моменту інерції вдвічі, тривалість виходу на номінальну швидкість зростає майже в 1,6 раза, що відповідно збільшує витрати енергії на фазу запуску. Така залежність підкреслює необхідність врахування масогабаритних характеристик оброблюваного середовища при проєктуванні та керуванні обладнанням [7].

У таблиці 1 представлено типові параметри перехідних процесів для насосів, мішалок і теплових апаратів. Враховано три ключові характеристики: тривалість виходу на номінальний режим, пікове навантаження (струм) та теплові втрати.

У контексті підвищення ефективності функціонування технологічних машин особливого

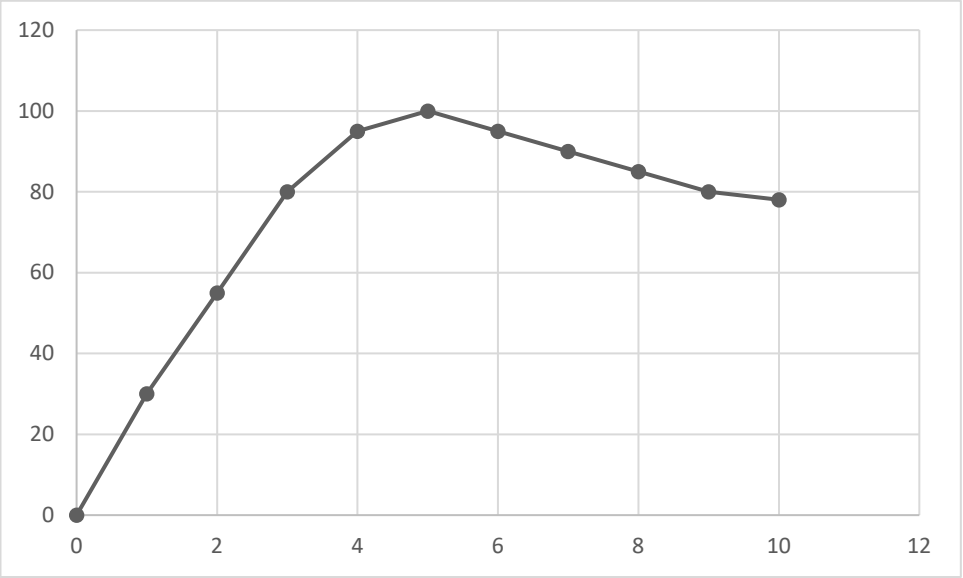


Рис. 1. Динаміка споживаного струму насосного агрегата

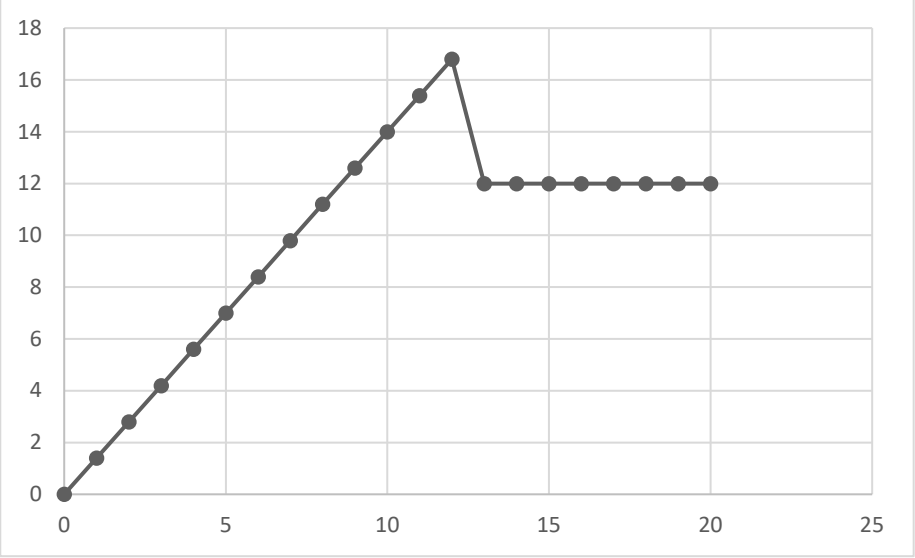


Рис. 2. Порівняння моменту інерції обертання ротора залежно від маси навантаження

Таблиця 1

Параметри перехідних процесів

Тип обладнання	Тривалість виходу на номінальний режим, с	Пікове навантаження, % від номінального	Теплові втрати, % від загального бюджету
Насос	7.5	275	14
Мішалка	10.2	230	13
Тепловий апарат	5.8	190	10

значення набуває аналіз перехідних процесів, що супроводжують запуск, зупинку або зміну режимів роботи агрегатів. Ці процеси безпосередньо впливають на динаміку навантажень, теплові втрати й загальний ресурс експлуатації обладнання. Наприклад, у насосів середнього класу тривалість перехідного процесу становила 6–9 с, а пікові навантаження досягали 275 % від номінальних. Для мішалок із густими середовищами пікове значення моменту складало понад 230 %, а теплові втрати в обмотках під час запуску сягали 12–15 % загального теплового бюджету обладнання [6; 7]. У теплових апаратах значущими є температурні коливання в теплообмінних трубках, які призводять до термічної деформації і втоми матеріалів, особливо під час швидких запусків чи частих зупинок [9; 10].

Особливо актуальним у цьому контексті стає впровадження систем енергетичної рекуперації, які дозволяють зменшити втрати енергії під час перехідних режимів, особливо в динамічно навантажених сегментах виробництва. У деяких технологічних машинах – зокрема, в укладальниках, що працюють з високою циклічністю, – використання рекуперaційних модулів дає змогу частково відновлювати кінетичну та теплову енергію, накопичену в перехідних фазах, і спрямовувати її на повторне живлення систем. Такий підхід не лише підвищує енергетичну ефективність, але й знижує амортизаційні навантаження на обладнання.

Таким чином, результати дослідження показали, що перехідні процеси здатні формувати до 30 % загальних енергетичних витрат технологічного обладнання. Їх вплив є особливо значущим у випадках частих циклів вмикання/вимикання, неперервного переналаштування режимів або при недостатньо точному керуванні пусковими параметрами [8]. Втрачену енергію не лише складно компенсувати, але й вона генерує додаткове тепло, що може потребувати додаткових витрат на охолодження. В умовах промислової експлуатації це призводить до перевантаження вузлів, зниження ресурсу роботи та збільшення витрат на технічне обслуговування.

Оптимізація перехідних процесів технологічного обладнання у харчовій промисловості передбачає не лише ідентифікацію надлишкових енерговитрат, але й пошук технічних рішень для їхнього зниження. У цьому контексті особливу роль відіграють частотні перетворювачі та адаптивні системи керування, які забезпечують гнучке регулювання режимів роботи, зменшення навантажень на вузли та підвищення загальної енергоефективності. Завдяки оптимізації динаміки пуску й зупинки, такі системи дозволяють уникати критичних пікових навантажень у ключових технологічних машинах, що працюють із перервним або змінним навантаженням. Особливо це стосується обладнання з високим моментом інерції – наприклад, укладальників, мішалок чи насосів. Упровадження технологій енергетичної рекуперації в таких агрегатах дає змогу не лише гасити надлишкову енергію, а й повертати її в систему, зменшуючи сумарне енергоспоживання. У результаті перехідні процеси стають контрольованими і передбачуваними, що позитивно впливає на тривалість служби обладнання та тепловий режим його елементів.

У дослідженні розглянуто впровадження частотних перетворювачів Schneider Electric Altivar 312 ATV312HU22N4 2,2 кВт 380 В (рис. 3) та проаналізовано результати їх роботи порівняно з класичними схемами керування.

Рис. 3. Перетворювач Schneider Electric Altivar 312 ATV312HU22N4

На рисунку 4 подано результати запуску мішалки з в’язким середовищем у стандартному режимі та з частотним регулюванням.

Як видно з рисунку 4, класичний пуск супроводжується стрибкоподібним ростом обертів, що викликає пікове навантаження на електропривід і сильні температурні коливання в обмотках. Натомість, використання частотного регулятора забезпечує плавне наростання швидкості, зменшуючи струмовий пік на 48 % та скорочуючи

Рис. 4. Динаміка запуску мішалки: класичне керування проти частотного регулювання

тривалість виходу на номінальний режим майже на 35 %. Таке керування дозволяє знизити термічне навантаження на двигун, зменшити вібрації та підвищити ресурс механічної частини обладнання, що підтверджується в роботах [6; 7].

У таблиці 2 узагальнено результати порівняння енергоспоживання у перехідних режимах за умов класичного та частотного керування.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика енергоспоживання у перехідних режимах

Тип обладнання	Класичне керування (кВт·год)	Частотне керування (кВт·год)	Економія (%)
Насос	3.9	2.8	28.2
Мішалка	4.5	3.39	24.7

Наведені дані демонструють, що при використанні частотного перетворювача середнє енергоспоживання в перехідному режимі зменшилось із 3,9 кВт·год до 2,8 кВт·год для насосного агрегату середнього класу, що становить економію на рівні 28,2 %. Аналогічні результати були отримані й для мішалок – енергоспоживання зменшилося на 24,7 %. Крім того, зниження пікового струмового навантаження на двигун у режимі запуску (рис. 5) досягло 41–53 % в залежності від типу обладнання, що значно зменшило теплове старіння та знос обмоток.

Суттєве покращення показників також забезпечує адаптивне керування, яке реалізується через поєднання частотного регулювання з контролем технологічних параметрів у реальному часі. Розроблений алгоритм модульного автоматизованого керування включає чотири етапи: 1) діагностика навантаження; 2) вибір оптимального закону зміни частоти; 3) контроль за температурою, моментом та частотою обертання; 4) корекція алгоритму в залежності від поточного стану системи. Такий підхід забезпечує не лише зниження енергоспоживання, а й динамічну адаптацію до змін середовища чи обсягу обробки.

Сучасні технологічні машини харчових виробництв, зокрема укладальники, фасувальні автомати та дозатори, працюють у режимах з високою частотою запусків і зупинок, що значно підсилює динамічні навантаження на вузли приводу. У таких умовах надзвичайно перспективним є впровадження систем енергетичної рекуперації – зворотного повернення енергії, що вивільняється при гальмуванні рухомих елементів машин, у мережу або живлення допоміжних систем. Зокрема, у випадку укладальників, які працюють циклічно з чергуванням фази розгону та гальмування, використання рекуперaційних перетворювачів дозволяє перетворювати надлишкову кінетичну енергію у корисну електричну [11].

Такий підхід не лише знижує сумарне енергоспоживання, а й зменшує нагрів обмоток двигунів, підвищує ресурс гальмівних систем і сприяє стабілізації перехідних процесів. На рівні керування доцільно застосовувати рекуперaційні модулі в поєднанні з адаптивним ПІ-регулюванням і цифровим прогнозуванням навантаження, що особливо ефективно в умовах варіативного навантаження на привод (наприклад, при укладанні продукції різної маси чи

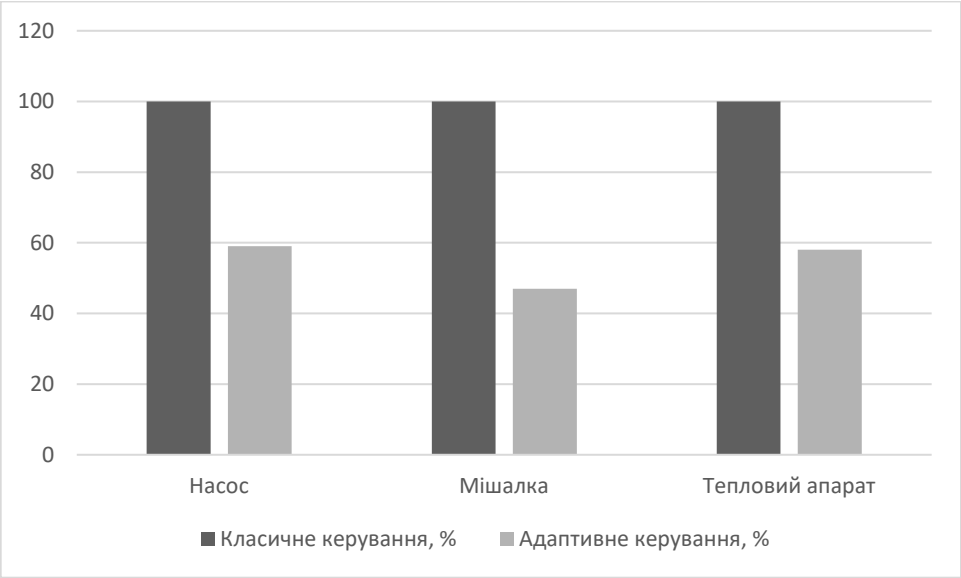


Рис. 5. Зниження пікового струмового навантаження при адаптивному запуску

конфігурації). Впровадження таких рішень дозволяє досягти комплексного підвищення енергоефективності, з одночасною економією електроенергії на 12–18 % у кожному робочому циклі, що підтверджено в дослідженнях [12].

Важливо, що реалізація адаптивного керування дозволила зменшити коливання температури в обмотках електроприводів на 7–10 °C у порівнянні зі стандартним режимом, що продовжує термін їх служби щонайменше на 15–20 %. Підтвердження цьому знаходимо у сучасних дослідженнях, які доводять залежність енергоспоживання від плавності керування у динамічних режимах [8, 9], а також у моделюваннях щодо ефективності теплових режимів у харчовому обладнанні [10, 11].

Оптимізація перехідних процесів у технологічних машинах харчової промисловості спрямована на зниження надлишкових енерговитрат і стабілізацію динаміки запуску та зупинки. Частотні перетворювачі та адаптивні системи керування дозволяють гнучко регулювати режими, зменшувати навантаження та втрати, а також активувати механізми енергетичної рекуперації. Ефективність таких рішень значною мірою залежить від точної прив'язки до технологічної карти виробництва, адже зміна режиму в одному вузлі може впливати на весь процес [12]. Особливо це важливо для обладнання з високою інерційністю – насосів, мішалок, укладальників.

У межах дослідження було створено цифрову модель технологічного процесу з подальшою інтеграцією в систему автоматичного керування, яка дозволяє в режимі реального часу аналізувати і враховувати такі змінні параметри, як густина середовища, температурний градієнт, тривалість і фази технологічного циклу. Завдяки цьому алгоритм керування динамічно підлаштовується під поточні умови роботи технологічних машин, забезпечуючи стабілізацію динаміки, мінімізацію пікових навантажень, згладжування перехідних процесів і загальну стійкість системи. Особливе значення має реалізація функцій енергетичної рекуперації, що дозволяє перетворювати надлишкову енергію перехідних режимів на корисну, підвищуючи загальну ефективність. Така інтеграція цифрових моделей у виробничі цикли дозволяє досягати економії енергії до 25 % без втрати продуктивності, з одночасним зниженням зносу вузлів та підвищенням надійності роботи технологічного обладнання.

Цифровий моніторинг технічного стану устаткування набуває дедалі більшого значення в умовах індустрії 4.0, особливо коли йдеться про технологічне обладнання харчових виробництв, де стабільність і довговічність агрегатів мають безпосередній вплив на якість і безпеку продукції [13]. У рамках дослідження було впроваджено систему моніторингу на базі енергометрів Energomera та термодатчиків контактного типу, що дозволило у реальному часі фіксувати зміни струму, температури й вібраційних параметрів під час перехідних режимів роботи обладнання.

Одним із ключових результатів стало виявлення значного зниження температурного навантаження після впровадження системи цифрового контролю. На рисунку 6 показано, як змінюється температурний профіль теплового апарата при запуску до й після встановлення моніторингового модуля.

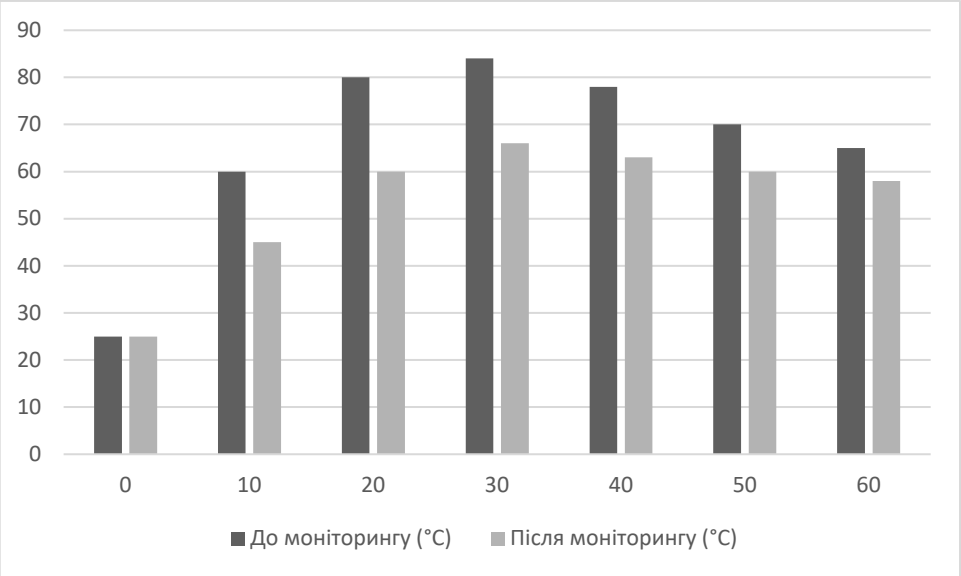


Рис. 6. Температурний профіль теплового апарата при запуску

До впровадження система фіксувала пікові значення температури, що досягали 84 °C із тривалим спадом до робочого рівня. Після оптимізації перехідного режиму та впровадження частотного регулювання температурна крива стала більш плавною, пікові значення зменшилися до 66 °C, а час виходу на стабільний рівень скоротився вдвічі. Це свідчить про зменшення теплових ударів, що в перспективі дозволяє знизити ризик перегріву матеріалів і запобігти передчасному зносу елементів системи.

У таблиці 3 узагальнено результати вібраційного й температурного моніторингу на трьох типах обладнання.

Таблиця 3

Результати вібраційного й температурного моніторингу

Тип обладнання	Скорочення вібраційної амплітуди (%)	Зниження пікової температури (%)
Мішалки	31	22
Насоси	27	19
Теплові апарати	18	16

Найбільше скорочення вібраційної амплітуди було зафіксовано у мішалках – до 31 %, що пов'язано з пом'якшенням пускових режимів і зменшенням механічного ударного навантаження, а також стабілізацією динаміки роботи привідних вузлів. У насосах вібраційне навантаження зменшилось на 27 %, тоді як у теплових апаратах – до 18 %. Зниження пікових температурних показників становило в середньому 16–22 %, залежно від конфігурації теплообміну та умов експлуатації.

Завдяки тривалому збору даних, а також використанню Mathcad для математичного прогнозування зносу елементів, вдалося змоделювати вплив оптимізованих перехідних процесів на ресурс основних вузлів (рис. 7).

Як видно з рисунку 7, найбільший приріст ресурсу спостерігається у підшипникових вузлах мішалок – до 26 %, що зумовлено стабілізацією обертів під час запуску та зниженням вібраційного навантаження. Електродвигуни насосів демонструють подовження міжремонтного періоду на 19 %, зумовлене зменшенням пікових струмів і температур у фазі старту. У теплових апаратах подовження строку служби трубчастих елементів становить до 17 % завдяки зменшенню амплітуди температурних коливань при запуску, що знижує ризик термічних деформацій і мікротріщин. Отже, впровадження адаптивного керування та частотного регулювання не лише знижує енергоспоживання, а й істотно покращує довговічність обладнання, оптимізуючи технічне обслуговування та зменшуючи загальні експлуатаційні витрати.

Системи моніторингу також дозволили реалізувати концепцію предиктивного обслуговування: замість планової заміни агрегатів через фіксований час, обслуговування тепер може базуватися на реальному технічному стані вузлів. Це забезпечує точне відстеження динаміки зносу компонентів, дозволяє прогнозувати критичні перехідні процеси та своєчасно вживати заходів для уникнення аварійних ситуацій. Таким чином,

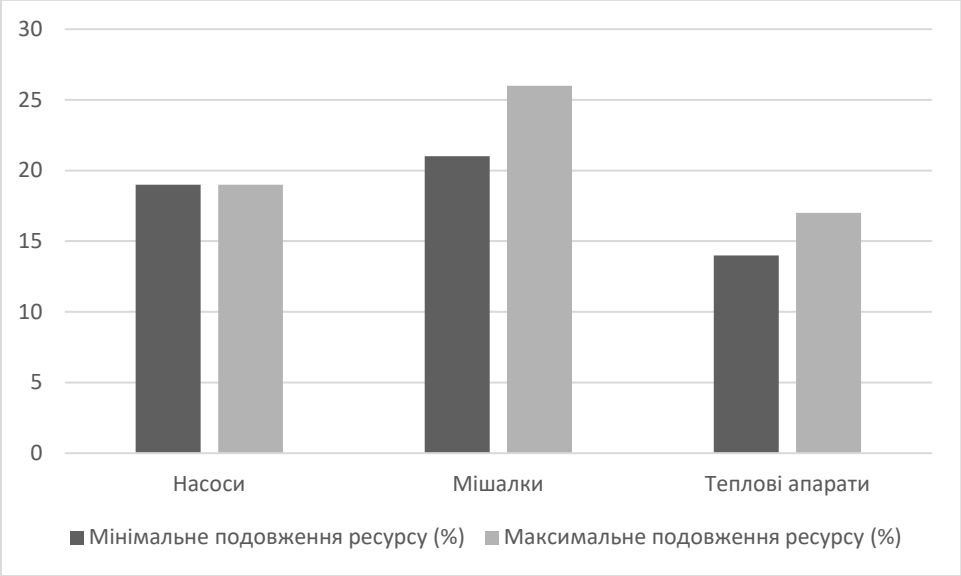


Рис. 7. Прогнозоване подовження ресурсу обладнання після оптимізації перехідних процесів

підвищується надійність функціонування ключових технологічних машин і зменшуються витрати на утримання обладнання. Одночасно, за рахунок точного контролю режимів навантаження, активується потенціал енергетичної рекуперації – повернення надлишкової енергії в систему під час гальмування або переходу в менш енергоємні стани.

Загалом результати дослідження підтвердили, що цифровий моніторинг технічного стану в поєднанні з адаптивним керуванням дає змогу істотно знизити енергоспоживання в перехідних режимах, зменшити механічне й термічне навантаження на елементи обладнання, а також суттєво подовжити їхній ресурс. З огляду на це, системи з підтримкою рекуперації та інтелектуального керування слід розглядати як доцільне рішення для впровадження в технологічні процеси харчової промисловості, де стабільність і ефективність є критично важливими.

Висновки. Результати дослідження підтвердили ефективність оптимізації перехідних процесів як дієвого засобу підвищення енергоефективності технологічного обладнання в харчовій промисловості. Було доведено, що динамічні режими – запуск, зупинка, перехід між технологічними параметрами – можуть формувати до 30 % загального енергоспоживання, спричиняючи зростання температурних і вібраційних навантажень та зниження ресурсу вузлів. Застосування частотних перетворювачів Schneider Altivar у поєднанні з адаптивними алгоритмами керування дозволило знизити середнє енергоспоживання у перехідних режимах на 24,7–28,2 %, а пікове струмове навантаження – до 53 %. Впровадження системи цифрового моніторингу (Energomera, термодатчики) забезпечило контроль за температурою і вібраціями в реальному часі, що дозволило перейти до предиктивного обслуговування. Математичне прогнозування у Mathcad засвідчило, що подовження ресурсу обладнання становить: для електродвигунів насосів – 19 %, підшипників мішалок – до 26 %, трубчастих елементів теплових апаратів – до 17 %. Інтеграція цифрових моделей у виробничі карти забезпечила гнучке налаштування алгоритмів під конкретні технологічні умови, підвищивши надійність та ефективність процесів. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження адаптивного частотного керування і цифрового моніторингу як комплексної системи енергоменеджменту на харчових підприємствах. Отримані дані можуть бути використані для модернізації наявного обладнання, розробки нових енергоощадних виробничих ліній і формування довгострокової стратегії сталого розвитку харчової галузі України.

Список літератури:

1. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Омельченко О. В. Шляхи вирішення питання оптимального вибору обладнання для охолодження та заморожування продуктів харчування на основі оцінки його енергоефективності. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2022. Т. 44, № 1. С. 66–76.

2. Eppinger T., Longwell G., Mas P., Goodheart K., Badiali U., Aglave R. Increase food production efficiency using the executable digital twin (xDT). *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 87. P. 37–42.

3. Padhiary M. Bridging the gap: Sustainable automation and energy efficiency in food processing. *Agricultural Engineering Today*. 2023. Vol. 47, No. 3. P. 47–50.

4. Adnouni M., Jiang L., Zhang X. J., Zhang L. Z., Pathare P. B., Roskilly A. P. Computational modelling for decarbonised drying of agricultural products: Sustainable processes, energy efficiency, and quality improvement. *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 338. Article 111247.

5. Arya S. S., More P. R., Ladole M. R., Pegu K., Pandit A. B. Non-thermal, energy efficient hydrodynamic cavitation for food processing, process intensification and extraction of natural bioactives: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023. Vol. 98. Article 106504.

6. Криворотько В. М., та ін. Динаміка і рекуперація вторинних енергетичних ресурсів у механічних системах. *Наукові праці НУХТ*. 2014. Т. 20, № 1. С. 171–180.

7. Степанець О. І., Пригодій Д. В., Ткачук Н. А. Динаміка і енергетична рекуперація в технологічних машинах. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 5, ч. 2. С. 26–32.

8. Abeykoon C., McMillan A., Nguyen B. K. Energy efficiency in extrusion-related polymer processing: A review of state of the art and potential efficiency improvements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147. Article 111219.

9. Erdogdu F. Mathematical modeling of food thermal processing: Current and future challenges. *Current Opinion in Food Science*. 2023. Vol. 51. Article 101042.

10. Szpicer A., Bińkowska W., Wojtasik-Kalinowska I., Salih S. M., Półtorak A. Application of computational fluid dynamics simulations in food industry. *European Food Research and Technology*. 2023. Vol. 249, No. 6. P. 1411–1430.

11. Dezhdar A., Assareh E., Agarwal N., Keykhah S., Aghajari M., Lee M. Transient optimization of a new solar-wind multi-generation system for hydrogen production, desalination, clean electricity, heating, cooling, and energy storage using TRNSYS. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 208. P. 512–537.

12. Yu H., Mei J., Xie J. New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 90. Article 106185.

13. Ismail M. I., Yunus N. A., Hashim H. Integration of solar heating systems for low-temperature heat demand in food processing industry – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147. Article 111192.

Skuibida Ye.L. IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF FOOD PRODUCTION EQUIPMENT BY OPTIMIZING TRANSIENT PROCESSES

The issue of energy efficiency in the food industry has gained significant importance due to the rising cost of energy resources, tightening environmental requirements, and the need to implement sustainable production approaches. This article explores one of the effective ways to improve the energy efficiency of technological equipment in food processing through the optimization of transient processes – dynamic operational modes that occur during equipment start-up, shutdown, or transition between technological parameters. A substantial portion of energy consumption at production facilities is attributed to transient processes, which are often overlooked during operational planning, leading to unnecessary energy losses and reduced equipment lifespan. The study analyzes common transient processes that occur in thermal and mechanical equipment used for various food production purposes. A mathematical model is developed to describe their behavior, taking into account thermophysical, kinematic, and inertial parameters that influence process stability and control accuracy. Particular attention is paid to the implementation of frequency regulation of electric drive speed, the application of adaptive control systems, modular automation solutions, and the use of real-time condition monitoring systems for key production units. Based on the obtained experimental and simulation results, the effectiveness of the implemented solutions has been confirmed: the average reduction in energy consumption during transient modes amounted to 24.7–28.2%, peak current loads were reduced by up to 53%, vibration loads – by up to 31%, and thermal overloads – by 16–22%. The optimization of transient processes contributed to an extended service life of the equipment: electric motors – by 19%, bearing units – up to 26%, and heat exchange elements – by 17%, all achieved without compromising the stability or quality of the production process. As a result, practical recommendations are provided for the implementation of optimized control algorithms under actual industrial conditions. The findings of the article can be applied for the modernization of existing production lines, the design of new energy-efficient technological systems, and the development of energy management policies within food industry enterprises.

Key words: *energy efficiency, food industry, transient processes, frequency regulation, mathematical modeling, equipment lifespan, adaptive control.*

ТРАНСПОРТ

УДК 656.7.073.1/.3.073.455:629.7.014.9]:[661.12:615.371]](477)"364"
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/42

Ботяков А.В.
Національний транспортний університет

БЕЗПІЛОТНІ АВІАЦІЙНІ СИСТЕМИ У ГУМАНІТАРНІЙ ЛОГІСТИЦІ: ТРАНСПОРТУВАННЯ ВАКЦИН З ДОТРИМАННЯМ ХОЛОДОВОГО ЛАНЦЮГА

Стаття присвячена дослідженню питання безпілотних авіаційних систем у гуманітарній логістиці в контексті транспортування вакцин з дотриманням холодового ланцюга. В ході проведеного дослідження автором було сформульовано визначення поняття «гуманітарна логістика». Також особливу увагу приділено визначенню характеристик гуманітарної логістики щодо організації гуманітарних поставок й критеріїв оцінювання їх ефективності, а саме своєчасність доставки, економічна вигідність, екологічність, чітка координація і злагодженість усіх учасників процесу доставки; гуманітарні поставки в умовах невизначеності і не прогнозованості надзвичайної ситуації, а також високий рівень небезпеки її виконання, зокрема необхідність підтримання холодового ланцюга медичних вантажів, а також потреба у постійному зворотному зв'язку з постраждалими для оцінки масштабів надзвичайної ситуації. У статті проаналізовано потреби населення України у гуманітарній допомозі, а також розподіл тих, хто потребує допомоги, за основними секторами/кластерами та гостротою потреб відповідно до їхнього місця проживання.

З огляду на той факт, що в Україні наявні воєнні виклики та необхідність забезпечення медичного обслуговування цивільного населення та військових на прифронтових територіях в статті досліджується БАС у транспортуванні вакцин. Проблема постачання гуманітарної допомоги на прифронтових територіях насамперед пов'язана з ризиками, викликаними бойовими діями, артилерійськими обстрілами та бомбовими, ракетними ударами, внаслідок чого виникають критичні збої в інфраструктурі, зокрема, пошкодження доріг та мостів, складів, енергетичної та телекомунікаційної мережі. Також транспортування традиційними засобами є неможливим через замінованість територій. Варто наголосити, що інтеграція дронів у ланцюг постачання вакцин, зокрема у системах постачання холодового ланцюга, дає значні переваги в скороченні часу доставки, забезпеченні безпеки персоналу, подоланні географічних бар'єрів, забезпеченні життєздатності вакцини за допомогою контролю температури, потенційному зниженні витрат і відходів, а також покращенні доступності вакцини у важкодоступних районах та районах, що постраждали від наслідків воєнних дій чи/та стихійних лих. Також було зазначено, що медичні працівники закладів, які обслуговуються логістикою дронів, сповіщали про менший дефіцит вакцин і менше втрачених можливостей щодо вакцинації, що викликало значне задоволення постачальників і кращі наслідки для здоров'я населення.

Ключові слова: *гуманітарна логістика, дрони* (*БПЛА*)*, холодовий ланцюг, вакцина, війна.*

Постановка проблеми. Нині у світі спостерігається складна ситуація в безпековій сфері – широкомасштабна війна росії проти України, політичне і військове протистояння на Ближньому сході, Південній, Західній Азії, наслідки пандемії COVID-19, стихійні лиха, техногенні небезпеки, фінансові та соціально-економічні кризи. У таких умовах актуалізується роль гуманітарних поставок у постраждалі регіони, де населення знаходиться у небезпеці і потребує негайної допомоги.

Гуманітарна логістика важлива в кризових ситуаціях, які породжені чинниками різної природи (наприклад, природними, економічними, техногенними, військовими, епідеміологічними тощо) і різних масштабів – від локальних (як наприклад, землетруси в окремих районах) до глобальних (зокрема, пандемії) [1; 2]. Організація

гуманітарної логістики пов'язана з наявністю ризиків та невизначеності ситуації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняними та зарубіжними вченими питанням організації гуманітарної логістики, а також транспортуванню гуманітарних вантажів, зокрема вакцин з дотриманням холодового ланцюга, приділяється певна увага. Зокрема, слід згадати праці Гринів Н.Т. [3], Чуприни О.О., Колосок Е.В., Григоренко О.В. [4], Мироненка В.К. [5], Абіді Х., де Леув С., Клумп М. [6], Апте А. [7], Бун Л. [8], Нікбахш Е., Фарахані Р.З. [9], Оверстріт Р.Е., Холл Д., Ханна Дж.Б., Райнер Р.К. [10], Томас А.С., Копчак Л.Р. [11], Вега Д., Руссат К. [12], Енайаті С. та ін. [13; 14], Колтер М., Ексіголу С.Д., Пінклей С.Н., Проано Р.А. [15], Абвібово А. [16], Гунаратне К. [17], Хаідарі Л.А. та ін. [18], Гріффіт Е.В. та ін. [19], Аггарвал С. та ін. [20; 21], Кремер П. та ін. [22], Рабта Б., Вакмюллер К., Реінер Г. [23], тощо. Вони розглядають основи гуманітарної логістики та транспортного обслуговування в надзвичайних ситуаціях [5; 6; 8; 10; 23], особливості та завдання гуманітарної логістики [3; 4; 7; 10], питання трансформації логістичних потоків в умовах війни [3; 4], роль інформаційних технологій в організації доставки гуманітарної допомоги [8], шляхи запобігання несвоєчасній доставці гуманітарних вантажів [3; 9], проблеми вимірювання та управління ефективністю ланцюгів постачання гуманітарної допомоги [6; 11] та роль постачальників логістичних послуг, які є важливими гравцями в гуманітарній сфері, надаючи підтримку неурядовим організаціям та урядам під час реагування на великі катастрофи [12]. Зокрема, науковці зазначають, що БАС все частіше досліджуються як рішення для транспортування вакцин у системах постачання холодового ланцюга, особливо в регіонах зі складним рельєфом або обмеженою інфраструктурою [13]. Адже дрони дозволяють швидко доставляти вакцини у віддалені чи важкодоступні райони, значно скорочуючи час доставки порівняно з традиційними методами та покращуючи доступність вакцини та рівень охоплення в таких регіонах, як, наприклад, Вануату, Нігер, Гана, Руанда, Південно-Східна Азія та Індія [13–23].

Постановка завдання. Мета статті полягає у дослідження безпілотних авіаційних систем у гуманітарній логістиці в контексті транспортування вакцин з дотриманням холодового ланцюга.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні вітчизняне законодавство не регламентує поняття гуманітарна логістика та гуманітарна поставка. Визначення поняття «гуманітарний вантаж (товар)» можна сформулювати, виходячи з положень Закону України «Про гуманітарну допомогу» від 22.10.1999 року № 1192-XIV [24] і Порядку митного оформлення вантажів гуманітарної допомоги, затвердженого постановою КМУ від 22 березня 2000 р. № 544 (у редакції постанови КМУ від 17 квітня 2013 р. № 278) [25].

Відповідно до вищезазначених нормативно-правових актів, гуманітарний вантаж – це товар, що ввозиться на митну територію України як гуманітарна допомога [26; 24; 25]. У свою чергу, під гуманітарною допомогою слід розуміти цільову адресну безоплатну допомогу у грошовій чи натуральній формі, у формі безповоротної фінансової допомоги чи добровільних пожертвувань, чи допомогу у формі виконання робіт, надання послуг, яка надається іноземними і вітчизняними донорами щодо мотивів гуманності отримувачам гуманітарної допомоги в межах України чи за кордоном, що потребують допомоги внаслідок соціальної незахищеності, матеріальної незабезпеченості, скрутним фінансовим становищем і введенням воєнного чи надзвичайного стану, виникненням надзвичайної ситуації чи тяжкою хворобою певної конкретної фізичної особи, а також зокрема для підготовки збройного захисту держави і її захисту у разі збройної агресії чи збройного конфлікту (Закон України «Про гуманітарну допомогу») [24].

У табл. 1 представлено визначення поняття «гуманітарна логістика», що знайшли своє відображення в наукових працях вітчизняних та зарубіжних дослідників, а також публікаціях міжнародних організації (Європейського Союзу, Асоціації держав Південно-Східної Азії) [3; 4; 5; 7; 8; 9; 11; 27; 28].

Аналіз і узагальнення визначень, наведених в табл. 1, дозволяє зробити висновок, що гуманітарна логістика – це галузь загальної логістики, яка включає весь комплекс операцій з управління матеріальними ресурсами та супутніми їм потоками інформації в умовах надзвичайних ситуацій з метою своєчасного і ефективного надання необхідної допомоги постраждалим.

Концептуалізація гуманітарної логістики часто базується на типових стратегічних рисах ланцюгів поставок, що проявляються залежно від подій до/після надзвичайної ситуації або

Таблиця 1

Огляд підходів до визначення гуманітарної логістики

№	Автор	Визначення поняття «гуманітарна логістика»
1	Гринів Н.Т. [3]	Гуманітарна логістика – це галузь логістики, яка забезпечує своєчасну доставку та зберігання запасів необхідних товарів для постраждалих людей та регіонів під час надзвичайних ситуацій, воєнних дій або стихійних лих.
2	Чуприна О.О., Колосок Е.В., Григоренко О.В. [4]	Гуманітарна логістика, спираючись на теоретичний базис загальної логістики, передбачає управління матеріальними та супутніми потоками, спрямована на задоволення істотних суспільних потреб, в тому числі тих, що характеризуються непередбачуваністю та носять гуманітарний характер (на основі мінімізації часу реалізації логістичних завдань), забезпечуючи постраждалих людей товарами першої необхідності під час кризових ситуацій та сприяючи підвищенню якості їх життя.
3	Мироненко В.К. [5]	Гуманітарна логістика – це галузь логістики, яка спеціалізується на організації доставки та складування запасів під час стихійних лих або складних надзвичайних ситуацій для постраждалого району та людей, а також включає прогнозування та оптимізацію ресурсів, управління запасами та обмін інформацією.
4	Апте А. [7]	Гуманітарна логістика – спеціальна галузь логістики, яка керує ланцюгом постачання критично важливих товарів та послуг з такими викликами, як різке зростання попиту, невизначеність поставок, критичні часові вікна з огляду на вразливість інфраструктури та масштаб операцій.
5	Бун Л. [8]	Гуманітарна логістика стосується стратегічної координації, необхідної для ефективного постачання допомоги та припасів до регіонів, постраждалих від стихійних лих або конфліктів. Гуманітарна логістика – це термін, який використовується для опису скоординованих зусиль щодо своєчасного та економічно ефективного постачання допомоги та припасів до районів стихійного лиха.
6	Нікбахш Е., Фарахані Р.З. [9]	Гуманітарна логістика — це галузь логістики, що займається логістичними аспектами системи управління стихійними лихами, включаючи різні види діяльності, такі як закупівля, зберігання та транспортування продуктів харчування, води, ліків та інших матеріалів, а також людських ресурсів, необхідної техніки та обладнання, а також допомоги пораненим до та після стихійних лих.
7	Томас А.С., Копчак Л.Р. [11]	Гуманітарна логістика – це процес планування, впровадження та контролю ефективного, економічно вигідного потоку та зберігання товарів і матеріалів, а також пов'язаної з ними інформації від місця походження до місця споживання з метою полегшення страждань вразливих людей
8	Асоціація держав Південно-Східної Азії [27]	Гуманітарна логістика – це процес планування, впровадження, моніторингу та контролю придбання, зберігання та транспортування товарів і матеріалів з місця походження до місць стихійного лиха. Її метою є управління запасами, сприяння комунікації, підтримка інфраструктури та постачання ресурсів для ефективного та економічно вигідного полегшення страждань населення, що потерпає від стихійного лиха.
9	Європейська комісія [28]	Гуманітарна логістика стосується процесів та систем, що беруть участь у мобілізації людей, ресурсів, навичок та знань для допомоги вразливим людям, які постраждали від стихійних лих та складних надзвичайних ситуацій.

Джерело: складено автором на основі джерел [*3; 4; 5; 7; 8; 9; 11; 27; 28*]

однієї чи кількох фаз у межах циклу такої ситуації [29].

Огляд наукових джерел дає можливість виокремити такі особливості гуманітарної логістики [1–29]:

1) основними критеріями оцінювання ефективності гуманітарних поставок є: своєчасність (швидкість) доставки, доступність (безпосередня доставка в пункт, де виникла потреба), економічна вигідність (мінімальні витрати), екологічність (зниження шкідливого впливу на навколишнє середовище);

2) участь різних зацікавлених сторін (органів державної влади і місцевого самоврядування, донорів, міжнародних організацій, благодійних фондів, волонтерських організацій, безпосередніх учасників процесу доставки гуманітарних товарів – перевізників, логістичних операторів (експедиторів), складських комплексів), неузгодженість між якими може знизити оперативність

реагування на ситуацію, що вимагає чіткої координації і злагодженості їхніх дій;

3) організація гуманітарної поставки в умовах невизначеності і непрогнозованості виникнення надзвичайної ситуації, її масштабів, наслідків та тривалості;

4) високий рівень небезпеки виконання гуманітарної поставки, що вимагає точної ідентифікації ризиків та шляхів їх мінімізації;

5) необхідність підтримання холодового ланцюга гуманітарної поставки швидкопсувних вантажів та вантажів медичного призначення;

6) додаткова ускладненість гуманітарної поставки через віддаленість, важкодоступність і небезпечність регіонів виникнення надзвичайних ситуацій, ймовірність нестачі транспортних засобів і браку спеціалізованого персоналу, а також виникнення дефіциту товарів, критично важливих для забезпечення населення в цих регіонах;

7) налагодження постійного зворотного зв'язку з постраждалими регіонами для оцінки масштабів надзвичайної ситуації і конкретних потреб населення.

Відповідно до Плану гуманітарних потреб і реагування для України на 2025 р., підготовленого Управлінням ООН з координації гуманітарних справ, 12,7 млн. осіб потребують допомоги [30]. Фінансові потреби у допомозі визначаються на рівні 2,63 млрд. дол. США, проте планується надати допомогу лише 6,0 млн. осіб, що становить 47,24% від потребуючих [30]. У табл. 2 представлено інформацію про потребуючих допомогу у розрізі секторів/кластерів [30].

Як видно з даних табл. 2, найбільші потреби у людей в захисті (9,8 млн.), охороні здоров'я (9,2 млн.), а також воді, санітарії та гігієні (8,5 млн.) [30]. Водночас, планом передбачено надання лише 32,61% осіб допомоги в секторі охорони здоров'я, що є найменшим показником серед усіх секторів/кластерів [30]. Таким чином, в Україні найгостріша ситуація з наданням гуманітарної допомогою в сфері охорони здоров'я.

На рис. 1 представлено розподіл людей, що потребують допомоги, та гостроти потреб за населеними пунктами України [30].

З рис. 1 видно, що найбільш гостро потребують допомоги особи, що мешкають вздовж лінії фронту, у т.ч. і на окупованих територіях (Харківська, Луганська, Донецька, Запорізька, Дніпропетровська, Херсонська і Миколаївська області), а також на прикордонних з рф територіях (Сумська область) [30]. Гострота потреб визначається на надзвичайному та катастрофічному рівнях [30].

В таких регіонах актуалізується питання надання медичної допомоги, оскільки погіршується санітарно-епідеміологічна ситуація (в постійних стресових ситуаціях імунітет населення послаблюється, через погіршення стану води посилюються ризики виникнення інфекцій, що передаються через воду, залишаються проблемою такі інфекційні захворювання, як кір і дифтерія, спалахи кору, гепатиту А, поліомієліту, грипу та COVID-19) [31]. Тому для полегшення страждань людей та попередження інфекційних захворювань і важкого перебігу хвороб, важливим є постачання вакцин у такі регіони. Вакцини є особливим видом гуманітарної допомоги в сфері охорони здоров'я, які потрібні завжди: як у мирний, так і воєнний час, як в штатних (планових), так і екстрених умовах, оскільки захищають цивільне населення і військових від важких

Таблиця 2

Розподіл осіб, що потребують і яким планується надати допомогу за основними секторами/кластерами

Сектор/кластер	Потребують, млн. осіб	Планується		Фінансові потреба, млн. дол. США
		млн. осіб	% від потребуючих	
Координація та управління об'єктами розміщення ТПО	0,149	0,079	53,02	20,4
Освіта	1,6	0,8	50,00	84,6
Продовольча безпека та засоби до існування	5,0	2,3	46,00	613,4
Охорона здоров'я	9,2	3,0	32,61	130,9
Захист	9,8	3,8	38,78	445,2
Житло та непродовольчі товари	6,9	3,0	43,48	544,6
Вода, санітарія та гігієна	8,5	4,3	50,59	365,3

Джерело: складено і розраховано автором на основі джерела [30]

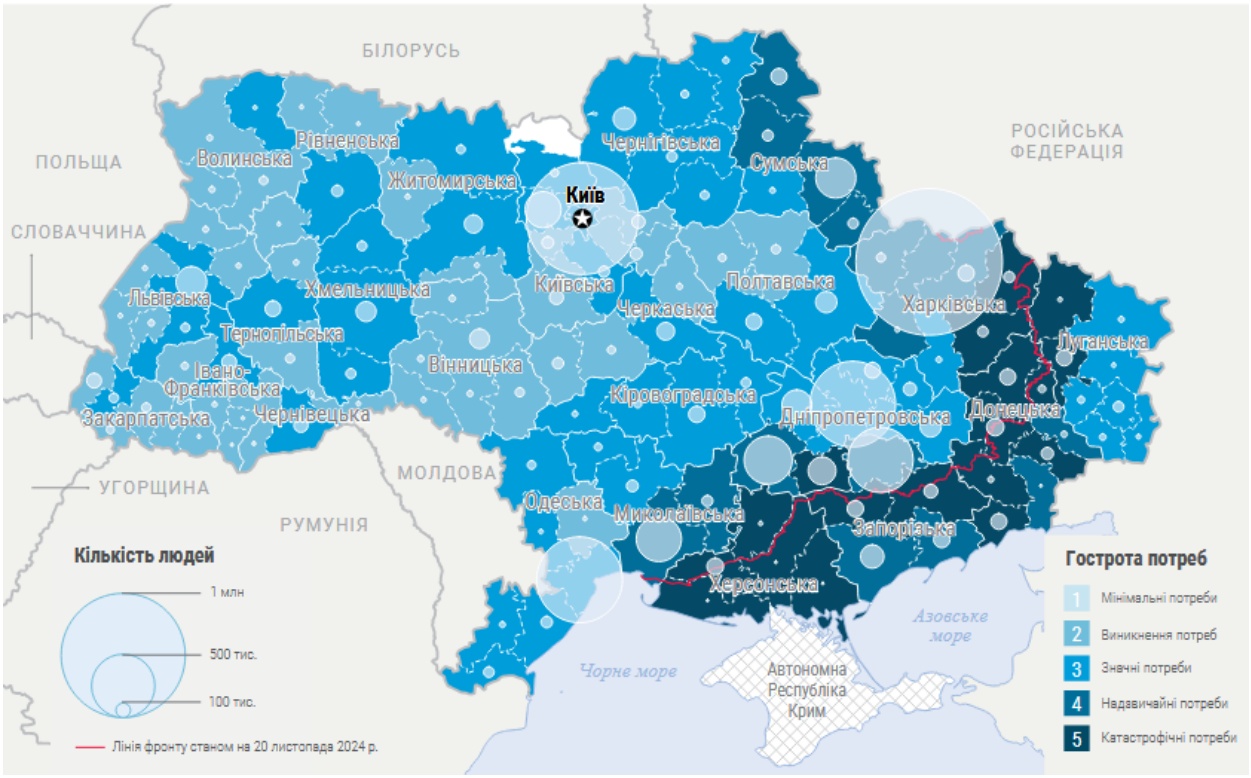


Рис. 1. Розподіл людей, що потребують допомоги, та гостроти потреб за населеними пунктами України [30]

інфекційних та вірусних захворювань. Складність постачання вакцин визначається необхідністю дотримання особливих умов холодового ланцюга [32].

Проблема постачання гуманітарної допомоги у ці регіони насамперед пов'язана з ризиками, викликаними бойовими діями, ракетними, артилерійськими обстрілами та бомбовими ударами, внаслідок чого виникають критичні збої в інфраструктурі, зокрема, пошкодження доріг та мостів, складів, енергетичної та телекомунікаційної мережі. Також транспортування традиційними засобами є неможливим через замінованість територій.

У цьому випадку актуальними стають такі технологічні інновації, як вантажні безпілотні авіаційні системи (дрони), які допомагають подолати «останню милю» в системі надання екстреної медичної допомоги [33; 23; 34]. В умовах воєнного стану дрони можуть доставити вакцини до зон бойових дій та деокупованих територій швидко і без ризику для, наприклад, водіїв та експедиторів. Використання БАС зменшує викиди в атмосферу і мінімізує відходи в усьому ланцюзі постачання [35]. БАС все частіше досліджуються як рішення для транспортування вакцин у системах постачання холодового ланцюга, особливо в регіонах зі складним рельєфом або обмеженою інфраструктурою [13]. Зокрема, дрони дозволяють швидко доставляти вакцини у віддалені або важкодоступні райони, значно скорочуючи час доставки порівняно з традиційними методами та покращуючи доступність вакцини та рівень охоплення в таких регіонах, як, наприклад, Вануату, Нігер, Гана, Руанда, Південно-Східна Азія та Індія [13–22]. Відповідно дрони можуть підтримувати необхідні температури холодового ланцюга під час транспортування, забезпечуючи цілісність і безпеку вакцини навіть у надзвичайно складних умовах [16; 19; 20; 21], зокрема інтеграція БАС у ланцюги постачання вакцин значно може зменшити витрати на їх транспортування [13; 14; 17; 18]. Варто також зазначити, що заклади, які обслуговуються логістикою дронів, повідомляють про менше дефіциту вакцини та втрачених можливостей вакцинації, що призводить до більшої задоволеності постачальників медичних послуг і покращення результатів для здоров'я [22]. Відповідно науковці зазначають, що стратегічне розміщення центрів (хабів) дронів, ретрансляційних станцій і центрів розподілу може ще більше підвищити економію коштів і якість обслуговування, за допомогою моделей, що демонструють диференційовані ролі великих і малих дронів у мультимодальних мережах [13; 14; 15].

Таким чином, потенціал БАС передбачає швидку доставку, безпеку персоналу, мінімізує запаси і відходи, збільшуючи ефективність перевезення [33–35; 13–23].

Лідером у застосуванні БАС для доставки товарів медичного призначення є каліфорнійська компанія Zipline [36]. Zipline доставляє кров, трансплантанти і вакцини пацієнтам у Руанді, Танзанії та Папуа-Новій Гвінеї; компанія довела ефективність використання такого типу поставки, значно скоротивши час доставки і зменшивши кількість зіпсованих вантажів, що є невід'ємними вимогами холодового ланцюга [37].

Поставки вакцин можуть бути організовані з використанням таких безпілотних літальних апаратів, як: вантажні квадрокоптери, гібридні вантажні дрони, а також дрони-кур'єри літакового типу [38; 36; 13; 39].

Для вибору оптимальної моделі БАС необхідно враховувати такі критерії: економічні витрати на виконання цільового завдання з поставки вакцин B, безпосадкова дальність польоту $Д_п$, вантажопідйомність $П_в$ та тривалість $T_п$ польоту [40].

Економічні витрати на виконання завдання з транспортування вантажів включають:

1) витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу (зовнішніх пілотів (операторів) та членів екіпажу безпілотного авіаційного комплексу) з усіма нарахуваннями на фонд оплати праці (нині в Україні нарахування єдиного соціального внеску від заробітної плати становлять 22%) $B_{оп}$;

2) вартість витратних матеріалів $B_{вм}$;

3) вартість палива $B_п$;

4) вартість використання наземних засобів забезпечення польотів $B_{нз}$;

5) загальновиробничі витрати $B_{зв}$, які включають амортизаційні відрахування, витрати на підготовку персоналу, витрати на будівництво і утримання систем базування тощо [40].

Таким чином, критерії оптимальності мають такий вигляд [40]:

$$\begin{cases} B \to min \\ B = B_{оп} + B_{вм} + B_п + B_{нз} + B_{зв} \\ Д_п \le Д_{п\,(задане\ значення)} \\ П_в \le П_{в\,(задане\ значення)} \\ T_п \le T_{п\,(задане\ значення)} \end{cases}$$

Критерії оптимальності передбачають мінімум сумарних витрат та відповідність показників вантажопідйомності, дальності та тривалості польоту безпілотного літального апарату заданому діапазону значень, що забезпечує дотримання вимог холодового ланцюга і виконання цільового завдання поставки вакцин у певній кількості на певну відстань у певний пункт призначення.

Висновки. В результаті проведеного дослідження нами було здійснений аналіз безпілотних авіаційних систем у гуманітарній логістиці в контексті транспортування вакцин з дотриманням холодового ланцюга, зокрема також проведений комплексний аналіз сутності поняття «гуманітарна логістика» й систематизація її специфічних рис. Автором сформульоване визначення поняття «гуманітарна логістика» під яким слід розуміти галузь загальної логістики, яка включає весь комплекс операцій з управління матеріальними ресурсами та супутніми їм потоками інформації в умовах надзвичайних ситуацій з метою своєчасного і ефективного надання необхідної допомоги постраждалим. Також зазначено, що організація гуманітарної поставки здійснюється в умовах невизначеності і непрогнозованості, характеризується високим рівнем небезпеки, передбачає виконання умов холодового ланцюга, що ускладнюється важкодоступністю зон виникнення надзвичайних ситуацій і дефіцитом ресурсів, участю різних зацікавлених сторін. Підкреслено, що основними критеріями оцінювання ефективності гуманітарних поставок є: своєчасність, доступність, економічна вигідність, екологічність. В статті визначено критерії вибору оптимальної моделі БАС для виконання завдання з доставки вакцин в умовах воєнного часу.

Отже, з огляду на означене вище, варто наголосити, що на сьогодні, враховуючи воєнні виклики в Україні, доцільно використовувати потенціал безпілотних авіаційних систем у транспортуванні гуманітарних вантажів медичного призначення, а саме вакцин, зокрема інтеграція дронів у ланцюг постачання вакцин, відповідно у системах постачання холодового ланцюга, дає значні переваги в подоланні географічних бар'єрів, забезпеченні безпеки персоналу, скороченні часу доставки, потенційному зниженні витрат і відходів, забезпеченні життєздатності вакцини за допомогою контролю температури, а також покращенні доступності вакцини у важкодоступних районах та районах, що постраждали від наслідків воєнних дій чи/та стихійних лих.

Список літератури:

1. Lockamy III A. Assessing disaster risks in supply chains. Industrial Management & Data Systems. 2014. Vol. 114. No. 5. P. 755–777. URL: https://doi.org/10.1108/imds-11-2013-0477 (дата звернення 18.05.2025 року).

2. Disaster risk factors – hazards, exposure and vulnerability / D.D. Saulnier, et al. *WHO Guidance on Research Methods for Health Emergency and Disaster Risk Management* / eds. R. Kayano, V. Murray, M. Clarke, E. YY Chan. Geneva: World Health Organization. 2021. 584 p. URL: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345591/9789240032286-eng.pdf (дата звернення 18.05.2025 року).

3. Гринів Н.Т. Гуманітарна логістика як інструмент трансформації логістичних потоків в умовах воєнного часу. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4 (дата звернення 18.05.2025 року).

4. Чуприна О.О., Колосок Е.В., Григоренко О.В. Гуманітарна логістика: особливості розвитку в сучасних реаліях. *Економіка та суспільство*. 2023. № 58. С. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-39 (дата звернення 18.05.2025 року).

5. Мироненко В.К. Основи гуманітарної логістики та транспортного обслуговування в надзвичайних ситуаціях. *Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг:* кол. моногр. / В.М. Самсонкін, І.В. Ніколаєнко, Ю.В. Булгакова та ін.; за ред. В.М. Самсонкіна та І.В. Ніколаєнко. Київ: Талком, 2021. С. 203–225.

6. Abidi H., de Leeuw S., Klumpp M. Humanitarian Supply Chain Performance Management: A Systematic Literature Review. *Supply Chain Management*. 2014. Vol. 19. No. 5/6. P. 592-608. URL: https://doi.org/10.1108/SCM-09-2013-0349 (дата звернення 18.05.2025 року).

7. Apte A. Humanitarian Logistics: A New Field of Research and Action. *Foundations and Trends in Technology Information and Operations Management*. 2010. Vol. 3. No. 1. P. 1–100. URL: http://dx.doi.org/10.1561/0200000014 (дата звернення 18.05.2025 року).

8. Boone L. Humanitarian logistics. *EBSCO*. 2024. URL: https://www.ebsco.com/research-starters/diplomacy-and-international-relations/humanitarian-logistics (дата звернення 18.05.2025 року).

9. Nikbakhsh E., Farahani R.Z. Humanitarian Logistics Planning in Disaster Relief Operations. *Logistics Operations and Management.* 2011. P. 291-332. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385202-1.00015-3 (дата звернення 18.05.2025 року).

10. Overstreet R.E., Hall D., Hanna J.B., Rainer R.K. Jr. Research in humanitarian logistics. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management.* 2011. Vol. 1. No 2. P. 114–131. URL: https://www.researchgate.net/publication/254192788_Research_in_Humanitarian_Logistics (дата звернення 18.05.2025 року).

11. Thomas A.S., Kopczak L.R. From Logistics to Supply Chain Management: The Path forward in the Humanitarian Sector. *Fritz Institute*, San Francisco. 2005. Vol. 15. P. 1–15.

12. Vega D., Roussat Ch. Humanitarian logistics: the role of logistics service providers. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management.* 2015. Vol. 45. Issue 4. P. 352-375. URL: https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2014-0309 (дата звернення 18.05.2025 року).

13. Enayati S., Campbell J.F., Li H. Vaccine distribution with drones for less developed countries: A case study in Vanuatu. *Vaccine X*. 2023. doi: 10.1016/j.jvacx.2023.100312. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590136223000530 (дата звернення 18.05.2025 року).

14. Multimodal Vaccine Distribution Network Design with Drones / S. Enayati et al. *Transportation Science*. 2023. Vol. 57. No 4. URL: https://doi.org/10.1287/trsc.2023.1205 (дата звернення 18.05.2025 року).

15. Designing Drone Delivery Networks for Vaccine Supply Chain: A Case Study of Niger / S. D. Eksigolu et al. *IISE Transactions on Healthcare Systems Engineering*. 2023. URL: https://doi.org/10.1080/24725579.2023.2268113 (дата звернення 18.05.2025 року).

16. Adwibowo A. Assessments of heavy lift UAV quadcopter drone to support COVID 19 vaccine cold chain delivery for indigenous people in remote areas in South East Asia. *medRxiv*. 2021. URL: https://doi.org/10.1101/2021.01.09.21249494 (дата звернення 18.05.2025 року).

17. Unmanned Aerial Vehicle Adaptation to Facilitate Healthcare Supply Chains in Low-Income Countries / K. Gunaratne et al. *Drones*. 2022. Vol. 6. No. 11. P. 321. URL: https://doi.org/10.3390/drones6110321 (дата звернення 18.05.2025 року).

18. The economic and operational value of using drones to transport vaccines / L. A. Haidari et al. *Vaccine*. 2016. Vol.34. no. 34. P. 4062–4067. doi: 10.1016/j.vaccine.2016.06.022. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27340098/ (дата звернення 18.05.2025 року).

19. The Use of Drones to Deliver Rift Valley Fever Vaccines in Rwanda: Perceptions and Recommendations/E.F.Griffithetal.*Vaccines*.2023.Vol.11.Issue3.URL:https://doi.org/10.3390/vaccines11030605 (дата звернення 18.05.2025 року).

20. Assessing the Feasibility of Drone-Mediated Vaccine Delivery: An Exploratory Study / S. Aggarwal et al. *Health Science Reports*. 2025. Vol. 8. No. 1. URL: https://doi.org/10.1002/hsr2.70208 (дата звернення 18.05.2025 року).

21. Enhancing Healthcare Access: Drone-based Delivery of Medicines and Vaccines in hard-to-Reach Terrains of Northeastern India / S. Aggarwal et al. *Preventive Medicine: Research & Reviews.* 2024. Vol. 1. Issue 4. URL: https://doi.org/10.4103/pmrr.pmrr_73_24 (дата звернення 18.05.2025 року).

22. An impact assessment of the use of aerial logistics to improve access to vaccines in the Western-North Region of Ghana / P. Kremer et al. *Vaccine*. 2023. Vol. 41. Issue 36. URL: https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2023.06.036 (дата звернення 18.05.2025 року).

23. Rabta B., Wankmüller C., Reiner G. A drone fleet model for last-mile distribution in disaster relief operations. *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2018. Vol. 28. P. 107–112. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.020 (дата звернення 18.05.2025 року).

24. Про гуманітарну допомогу: Закон України від 22 жовтня 1999 року № 1192-XIV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1192-14#Text (дата звернення 18.05.2025 року).

25. Про Порядок митного оформлення вантажів гуманітарної допомоги, затверджений постановою КМУ від 22 березня 2000 р. № 544 (у редакції постанови КМУ від 17 квітня 2013 р. № 278). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/544-2000-%D0%BF#Text (дата звернення 18.05.2025 року).

26. Порядок пропуску та обліку гуманітарної допомоги в умовах воєнного стану, затверджений Постановою КМУ від 5 вересня 2023 р. № 953. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/953-2023-%D0%BF#Text (дата звернення 18.05.2025 року).

27. Association of Southeast Asian Nations. URL: https://ascend.ahacentre.org/ascend-humanitarian-logistics/ (дата звернення 18.05.2025 року).

28. Evaluation of Humanitarian Logistics within EU Civil Protection and Humanitarian Action, 2013-2017 / European Commission, DG ECHO and Landell Mills International, Fenton, G., et al., 2019. URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2c0ab9b4-358a-11e9-8d04-01aa75ed71a1 (дата звернення 18.05.2025 року).

29. Kovács G., Spens K., Moshtari M. The Palgrave Handbook of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management. 2018. URL: https://doi.org/10.1057/978-1-137-59099-2 (дата звернення 18.05.2025 року).

30. Україна: План гуманітарних потреб і реагування 2025 р. *UNHCR*. URL: https://surl.li/lkanod (дата звернення 18.05.2025 року).

31. Малишко Д. Що відбувається зі сферою охорони здоров'я під час війни. Розмова з представником ВООЗ в Україні. 2024. URL: https://surl.li/lvscog (дата звернення 18.05.2025 року).

32. Порядок забезпечення належних умов зберігання, транспортування, приймання та обліку вакцин, анатоксинів та алергену туберкульозного в Україні, затверджений наказом Міністерства охорони здоров'я України від 16.09.2011 № 595. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1166-11#Text (дата звернення 18.05.2025 року).

33. Rejeb A., Rejeb K., Simske S., Treiblmaier H. Humanitarian Drones: A Review and Research Agenda. *Internet of Things.* 2021. Vol. 16. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660521000780 (дата звернення 18.05.2025 року).

34. Impact of Using Drones in Emergency Medicine: What Does the Future Hold? / Johnson A., et al. *Open Access Emergency Medicine*. 2021. No. 13. P. 487–498. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8605877/pdf/oaem-13-487.pdf (дата звернення 18.05.2025 року).

35. Stierlin N., Risch M., Risch L. Current Advancements in Drone Technology for Medical Sample Transportation. Logistics. 2024. No. 8 (4). 104. URL: https://doi.org/10.3390/logistics8040104 (дата звернення 18.05.2025 року).

36. Zipline designs, manufactures, and operates the world's largest drone delivery service. URL: https://www.flyzipline.com/ (дата звернення 18.05.2025 року).

37. Волянський П.Б., Ядченко Д.М., Мосов С.П., Печиборщ В.П., Якимець В.М., Хорошун Е.М., Печиборщ О.В., Якимець В.В. Медичні дрони – інновація державної служби медицини катастроф. *Харківська хірургічна школа.* 2021. № 3. С. 55–62. URL: https://doi.org/10.37699/2308-7005.3.2021.11 (дата звернення 18.05.2025 року).

38. The electric VTOL-fixed wing drone for urgent medical delivery. Taking to the skies to save lives. *CORDIS-EU*. 2022. URL: https://cordis.europa.eu/article/id/442746-taking-to-the-skies-to-save-lives (дата звернення 18.05.2025 року).

39. Introducing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Vaccine Transport in the Democratic Republic of Congo; Phase 1: Permissions, Preliminary Design, and Testing. (Final Report). *VillageReach*. 2019. URL: https://surl.li/dpyhqi (дата звернення 18.05.2025 року).

40. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту: монографія / Д.В. Бондар та ін. Київ : ГО «Європейська наукова платформа». 2022. 312 с. URL: https://surl.li/hyogxj (дата звернення 18.05.2025 року).

Botiakov A.V. **HUMANITARIAN LIGISTICS & UNMANNED AVIATION SYSTEMS IN THE CONTEXT OF COLD CHAIN VACCINES TRANSPORTATION**

The article explores the issue of humanitarian logistics & unmanned aviation systems in the context of cold chain vaccines transportation. In the course of the research, the author formulated a definition of the concept of "humanitarian logistics", and paid special attention to determining its characteristics in the context of organizing humanitarian supplies & criteria for assessing their effectiveness, as timeliness of delivery, economic profitability, environmental friendliness, clear coordination and coherence of all participants in the process; humanitarian supplies in conditions of uncertainty and unpredictability of the emergency situation, as well as high level of danger of its implementation, in particular the need to maintain the cold chain of medical cargo, and the need for constant feedback with victims. The severity & key clusters and sectors of humanitarian needs of Ukrainians were analyzed by author.

Given the fact that today Ukraine faces military challenges and the need to provide medical care to the civilian population of Ukraine & the military, the article analyzes the use of UAS in the vaccine transportation. The problem of delivering humanitarian aid to the regions in front-line area is associated with the risks that are caused by artillery shelling/bombing/missile attacks that bring damage of roads/bridges, energy and telecommunications networks (*critical infrastructure failures*). *Moreover, due to the mined territories, transportation is impossible by using the traditional ways. It is worth emphasizing that drones integration in cold vaccine supply chain gives serious advantages in reducing delivery time, ensuring personal safety, overcoming geographical barriers, ensuring vaccines viability, decrease waste and expense, and enhance accessibility of vaccines while delivering to hart-to-reach territories & people, who suffered from the results of military actions and/or disasters. Also it was mentioned, that medical workers from facilities served by drone logistics notified less vaccine shortage & fewer missed vaccination opportunities that caused significant provider satisfaction & better health outcomes.*

Key words: *logistics, drones, cold chain, vaccine, humanitarian, war.*

УДК 656.073
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/43

Гілевич В.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

Півторак Г.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

Суслов В.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

ОЦІНКА ВАЖЛИВОСТІ ПАРАМЕТРІВ ВИБОРУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ПРИ ПЕРЕМІЩЕННІ МІСЬКОЮ ТЕРИТОРІЄЮ

Ефективне планування сталої міської мобільності вимагає глибокого розуміння чинників, що визначають поведінку пасажирів при виборі ними способу переміщення в межах міста. На вибір користувача впливають не тільки фактичні значення певних параметрів, але і їх сприйняття індивідами, які приймають рішення про переміщення. Для підвищення популярності громадського транспорту потрібно розуміти, які параметри мають найбільше значення для його існуючих та потенційних користувачів. В роботі проаналізовано шість ключових критеріїв, якими характеризується поїздка громадським транспортом: тривалість поїздки, час очікування, час підходу до зупинки, вартість проїзду, комфортність поїздки та необхідність пересадки. Методологічною основою дослідження є метод найкращий–найгірший (Best-Worst Method), який дозволяє встановити ваги критеріїв на основі попереднього ранжування цих критеріїв користувачами транспортної системи. Початкові дані для дослідження зібрано шляхом проведення опитувань у м. Львові. За результатами аналізу відповідей респондентів встановлено, що найбільший вплив на вибір громадського транспорту має комфорт поїздки як комплексний показник, який враховує заповненість салону транспортного засобу, зручність сидінь, температурний режим в салоні, наявність низької підлоги тощо. Це свідчить про важливість якості рухомого складу для пасажирів на сучасному етапі розвитку системи громадського транспорту у Львові. Отримане значення коефіцієнта узгодженості підтверджує високу надійність отриманих результатів. Спостерігається зв'язок між рівнем комфорту та сприйняттям часу поїздки: за низького комфорту пасажири більше акцентують увагу на тривалості поїздки, тоді як у містах із розвиненою транспортною системою критичнішими є час очікування, пересадки та доступність. Результати дослідження можуть бути корисними для формування політики підвищення привабливості громадського транспорту.

Ключові слова: *модальний розподіл, вибір способу переміщення, міська мобільність, громадський транспорт, метод «найкращий-найгірший».*

Постановка проблеми. Ефективна сучасна політика управління попитом на транспортні послуги неможлива без розуміння чинників, які впливають на поведінку пасажирів при виборі ними способу свого переміщення [1]. Саме таке розуміння сприятиме розробці заходів формування сталої мобільності в межах міста, з акцентом на громадський транспорт (ГТ) та немоторизовані переміщення. Аналіз модального розподілу необхідний для прогнозування попиту на подорожі та планування розвитку транспортної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи останні наукові публікації, можна виділити кілька основних груп чинників, на яких зосереджуються дослідження, пов'язані з вивченням транспортної поведінки населення. До першої групи можна віднести форму міської забудови, до другої – соціо-демографічні та соціо-економічні чинники, до третьої – характеристики поїздки, а до четвертої – суб'єктивні поведінкові чинники.

В праці [2] подано результати досліджень впливу щільності населення та відстані до

центру міста на вибір способу переміщення міською територією на прикладі 19 європейських міст (в поєднанні з врахуванням соціо-демографічних та соціо-економічних показників). Згідно отриманих результатів, відстань поїздки найбільше впливає на вибір автомобіля як способу пересування, з наближенням до центру ймовірність вибору автомобіля зменшується. Автори [3] також зосереджуються на дослідженні чинників першої та другої груп: вивченні поведінки людей похилого віку при виборі способів пересування з врахуванням доступності громадського транспорту. Одним з отриманих ними висновків є те, що при зростанні якості інфраструктури ГТ досліджувана група населення ймовірніше обиратиме громадський транспорт незалежно від наявності в них власного автомобіля.

Критеріями впливу на вибір способу переміщення міською територією в праці [4] є тривалість переміщення, вартість переміщення, вартість паркування та рівень стресу від дорожнього руху (наскільки важко пішоходам чи велосипедистам користуватися дорогою). Вплив цих чинників на ймовірність вибору немоторизованого переміщення сегментується залежно від мети переміщення та рівня доходу подорожуючого. Згідно досліджень [5], на вибір способу пересування в межах міста впливає відстань проїздки, вік подорожуючих, погодні умови та щільність населення.

Частина досліджень робить акцент на громадському транспорті як єдиному на сьогодні дружньому до міського середовища способі задоволення попиту на переміщення на відстані, де немоторизовані переміщення вже не можуть вважатися альтернативою для більшості. Згідно досліджень, на зростання привабливості громадського транспорту значний вплив здійснює надійність та частота руху [6, 7] та близькість до зупинки [8, 9].

Вплив ставлення до певного виду переміщення на задоволеність від подорожі вивчається, зокрема, в праці [10]. На основі проведених досліджень автори стверджують, що формування позитивного ставлення до громадського транспорту та немоторизованих переміщень як дешевших, безпечніших, здоровіших та екологічніших способів пересувань (в поєднанні з реальними можливостями отримати заявлене при користуванні цими способами переміщень) може значно покращити модальний розподіл переміщень в місті.

Постановка завдання. Проведений аналіз наукової літератури загалом підтверджує висновки, сформульовані в праці [8], про те, що кожне місто має свої власні причини, які є основою модального розподілу переміщень і сприяють або перешкоджають розвитку сталих видів транспорту.

Основна ціль дослідження – наблизитися до розуміння того, які чинники найбільше впливають на вибір користувачами громадського транспорту як способу свого переміщення та які заходи будуть найефективнішими для підвищення популярності ГТ з урахуванням специфіки міста Львова.

Виклад основного матеріалу. Метод «найкращий-найгірший» (Best-Worst method – BWM) є одним з багатокритеріальних методів прийняття рішення для дискретних задач. Суть методу полягає у відносній оцінці альтернатив за певним набором критеріїв залежно від значимості цих критеріїв для індивіда, який приймає рішення [11]. Процес застосування методу можна поділити на п’ять кроків [11, 12]:

Крок 1. Формування набору критеріїв, які впливають на прийняття рішення:

$$\{c_1, c_2, ..., c_n\}$$

Крок 2. Визначення «найкращого» (a_B) та «найгіршого» (a_W) критерію.

Крок 3. Визначення переваги «найкращого» критерію над усіма іншими з використанням шкали від 1 до 9. Результуючий вектор матиме вигляд:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, ..., a_{Bn})$$

Значення a_{Bj} відображає перевагу «найкращого» критерію B над критерієм *j*.

Крок 4. Визначення переваги кожного з критеріїв над «найгіршим» критерієм з використанням шкали від 1 до 9. Результуючий вектор матиме вигляд:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, ..., a_{nW})^T$$

Значення a_{jW} відображає перевагу критерію *j* над критерієм *W*.

Крок 5. Знаходження оптимальних ваг критеріїв $(w_1^*, w_2^*, ..., w_n^*)$, тобто, таких ваг, при яких для кожної пари w_B / w_j та w_j / w_W виконується рівність $w_B / w_j = a_{Bj}$ та $w_j / w_W = a_{Wj}$. Цю задачу можна звести до задачі лінійного програмування вигляду:

мінімізувати відхилення $\xi \to \min$, враховуючи, що для всіх *j* дійсні умови:

$$\left|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}\right| \le \xi$$

$$\left|\frac{w_j}{w_W} - a_{jW}\right| \le \xi$$

$$\sum w_j = 1 \qquad w_j \ge 0$$

Крок 6. Розрахунок коефіцієнта узгодженості моделі:

$$CR = \frac{\xi}{CI}$$

Індекс узгодженості залежить від значення оцінки «найкращого критерію». Фактично, це максимальне значення відхилення ξ. Автор методу пропонує такі значення індексів узгодженості – табл. 1.

Таблиця 1

Значення індексів узгодженості для різних оцінок «найкращого» критерію [11]

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CI	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Для подальшого аналізу використано результати опитувань 73 респондентів щодо параметрів їх переміщень міською територією з використанням громадського транспорту. Опитування проводиться онлайн з використанням анкети, створеної у GoogleForms (посилання на анкету – [13]). В структурі вибірки 56% становлять чоловіки. Серед опитаних 69% студентів, що варто враховувати при інтерпретації результатів. Власним автомобілем володіють 53% опитаних, половина респондентів мають освіту в галузі транспорту. Більшість респондентів зазвичай переміщуються міською територією громадським транспортом (58%), 17% – власним автомобілем, 24% – пішки і 1% – велосипедом (всі опитані проживають мінімум останні півроку у Львові).

Критеріями оцінювання для громадського транспорту як способу переміщення обрано такі показники:

– Час переміщення. У випадку переміщення громадським транспортом, окрім тривалості поїздки $c_{рух}$, включає в себе також час підходу до зупинки $c_{підх}$ та очікування на зупинці $c_{оч}$. Кожен з цих елементів часу переміщення розглядається окремо.

– Вартість переміщення ($c_{вар}$). Станом на травень 2025 року вартість поїздки у громадському транспорті Львова становить 13 грн для власників картки Леокарт, 15 грн – при оплаті банківською карткою та 25 грн – при оплаті готівкою; пересадка в межах 40 хв для власників Леокарт є безкоштовною.

– Комфорт переміщення ($c_{комф}$). Комплексний показник, який включає в себе багато чинників, починаючи від конструктивних особливостей транспортного засобу і закінчуючи можливими способами оплати.

– Відсутність пересадки $c_{пер}$ (пересадка може збільшувати тривалість, вартість та втому від переміщення).

Кожен з цих критеріїв учасники опитування оцінювали за їх значимістю для себе, ранжуючи їх від найменш важливого до найважливішого. Діаграма, побудована на основі результатів опитувань, подана на рис. 1.

Значення середніх оцінок кожного з критеріїв подано в табл. 2.

Таблиця 2

Середні оцінки значимості критеріїв переміщення громадським транспортом (за 6-бальною шкалою)

Критерій	$c_{рух}$	$c_{підх}$	$c_{оч}$	$c_{вар}$	$c_{комф}$	$c_{пер}$
Середня оцінка	3,49	2,82	2,75	2,71	4,10	2,64

Найбільша середня оцінка – в критерію «комфортність переміщення», найменша – в критерію «відсутність пересадки». Тому приймаємо комфортність переміщення за «найкращий» критерії (в нашому випадку – найбільш значимий для опитаних), а критерій «відсутність пересадки», як «найгірший» критерій (найменш значимий для опитаних).

Для визначення переваги «найкращого» критерію проводимо попарне порівняння важливості комфортності переміщення над рештою критеріїв. Для цього використовуємо співвідношення між середніми оцінками критеріїв, пропорційно визначаючи проміжні бали для решти критеріїв. Результати подано в табл. 3 (з врахуванням округлення отриманих результатів до цілих чисел).

Таблиця 3

Порівняльна таблиця переваги «найкращого» критерію над рештою критеріїв

Пара критеріїв	Різниця середніх оцінок	Перевага (Best to Others)
$c_{комф} - c_{рух}$	0,61	3
$c_{комф} - c_{підх}$	1,28	7
$c_{комф} - c_{оч}$	1,35	8
$c_{комф} - c_{вар}$	1,39	8
$c_{комф} - c_{комф}$	0	1
$c_{комф} - c_{пер}$	1,46	9

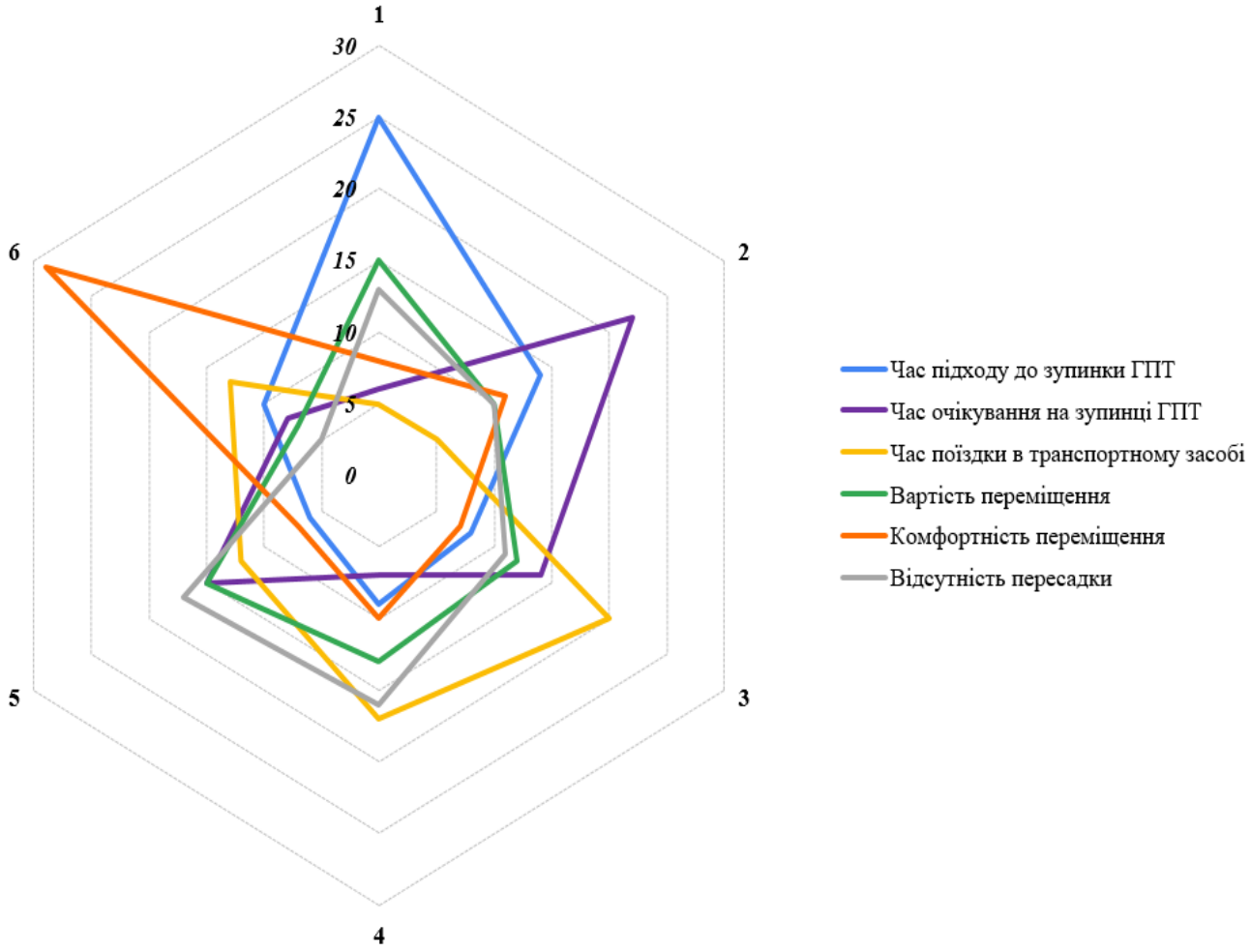


Рис. 1. Розподіл оцінок значимості параметрів переміщення міським громадським транспортом (1 – найменш значимий параметр, 6 – найзначиміший параметр)

Результуючий вектор має вигляд:

$$A_B = (a_{рух}, a_{підх}, a_{оч}, a_{вар}, a_{комф}, a_{пер}) = (3,7,8,8,1,9)$$

Аналогічно проводиться порівняння кожного з критеріїв з «найгіршим» критерієм, результуючий вектор має вигляд:

$$A_W = (a_{рух}, a_{підх}, a_{оч}, a_{вар}, a_{комф}, a_{пер})^T = (6,2,2,1,9,1)$$

Для пошуку оптимальних ваг критеріїв використано функцію «Розв'язувач» MS Excel, отримані оптимальні ваги критеріїв при значенні мінімального відхилення $\xi \to 0,06$ подано на рис. 2.

Коефіцієнт узгодженості моделі становить:

$$CR = \frac{0,06}{5,23} = 0,011$$

Значення $CR \le 0,1$ свідчить про дуже добру узгодженість оцінок.

Висновки. Отримані результати є цікавими для розуміння особливостей українських умов функціонування громадського транспорту. Велика значимість комфортності свідчить про потребу розвитку інфраструктури ГТ: оновлення парку рухомого складу, підвищення частоти руху для зменшення завантаженості транспортних засобів, особливо в пікові години. Комфорт поїздки безпосередньо впливає на сприйняття її тривалості. За умов низького рівня комфорту пасажири схильні приділяти більшу увагу саме часу поїздки, порівняно з часом очікування транспорту або часом підходу до зупинки. У таких випадках кожна додаткова хвилина у транспорті сприймається як більш обтяжлива. Водночас, дослідження, проведені в розвинених країнах, демонструють іншу динаміку: у системах із вищим рівнем базового комфорту пасажири частіше акцентують увагу саме на часі очікування транспорту, ходьбі та пересадках як на основних чинниках незручності [6]. Таким чином, пріоритетність часових параметрів у сприйнятті пасажирів значною мірою залежить від загального рівня комфорту транспортної системи.

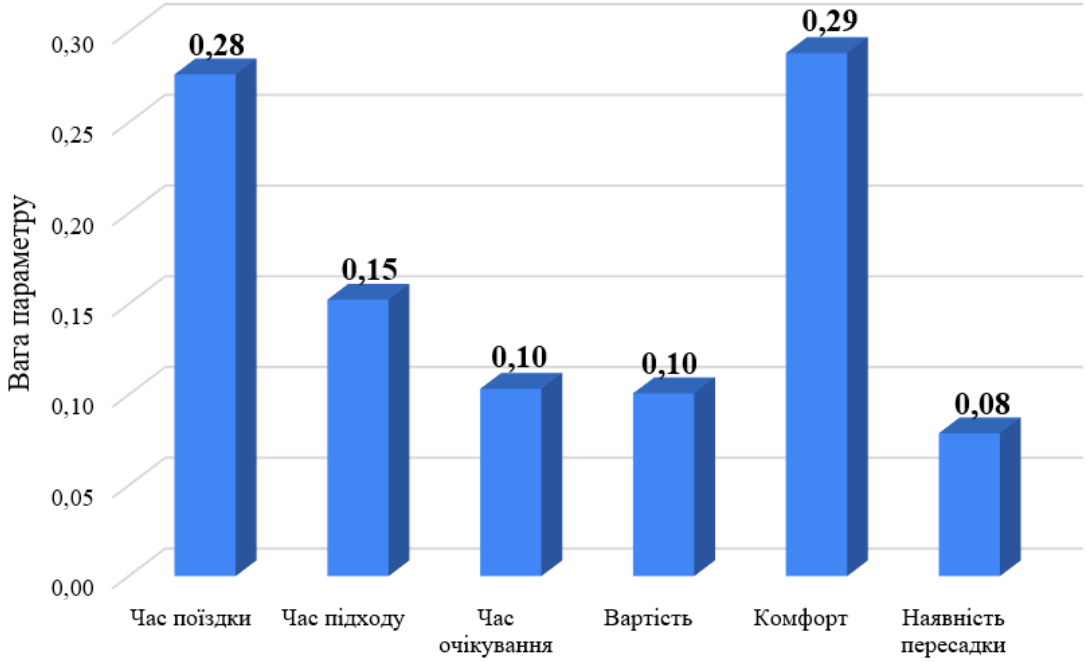


Рис. 2. Оптимальні ваги параметрів переміщення міським громадським транспортом

Список літератури:

1. Moeinaddini A., Habibian M. Exploring the role of objective and subjective factors on car commuters' mode change: An integrated choice and latent variable approach based on the theory of planned behavior. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2025. Vol. 109. P. 1470–1490. URL: https://doi.org/10.1016/j.trf.2025.01.009.

2. Comparing urban form influences on travel distance, car ownership, and mode choice / P. Berrill та ін. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*. 2024. Vol. 126. P. 104087. URL: https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104087.

3. Villena-Sanchez J., Boschmann E. E., Avila-Forcada S. Daily travel behaviors and transport mode choice of older adults in Mexico City. *Journal of Transport Geography*. 2022. Vol. 104. P. 103445. URL: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103445.

4. How the design of Complete Streets affects mode choice: Understanding the behavioral responses to the level of traffic stress / J. Bas et al. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*. 2023. Vol. 173. P. 103698. URL: https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103698.

5. Predicting the travel mode choice with interpretable machine learning techniques: A comparative study / M. T. Kashifi et al. *Travel Behaviour and Society*. 2022. Vol. 29. P. 279–296. URL: https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.07.003.

6. Göransson J., Andersson H. Factors that make public transport systems attractive: a review of travel preferences and travel mode choices. *European Transport Research Review*. 2023. Vol. 151. P. 32. URL: https://doi.org/10.1186/s12544-023-00609-x.

7. Shared micromobility and public transport integration-A mode choice study using stated preference data / A. Montes et al. *Research in Transportation Economics*. 2023. Vol. 99. P. 101302. URL: https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101302.

8. Yanar T. Understanding the choice for sustainable modes of transport in commuting trips with a comparative case study. *Case Studies on Transport Policy*. 2023. Vol. 11. P. 100964. URL: https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.100964.

9. Nakshi P., Debnath A. K. Impact of built environment on mode choice to major destinations in Dhaka. *Transportation Research Record*. 2021. Vol. 2675 (4). P. 281–296. URL: https://doi.org/10.1177/0361198120978418.

10. De Vos J., Singleton P. A., Gärling T. From attitude to satisfaction: introducing the travel mode choice cycle. *Transport Reviews*. 2022. Vol. 42 (2). P. 204–221. URL: https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1958952.

11. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*. 2015. Vol. 53. P. 49–57. URL: https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009.

12. Micro-hub location selection for sustainable last-mile delivery / M. Novotná et al. *Plos one*. 2022. Vol. 177. P. 0270926. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270926.

13. Опитувальник щодо характеристик переміщення міською територією. URL: https://forms.gle/75FjfpYthJJev3UN9 (дата звернення: 20.05.2025).

Hilevych V.V., Pivtorak H.V., Suslov V.V. ASSESSMENT OF THE IMPORTANCE OF PARAMETERS FOR PUBLIC TRANSPORT CHOICE IN URBAN TRAVEL

Effective planning of sustainable urban mobility requires a deep understanding of the factors that determine the behavior of passengers when choosing a mode of transportation within the city. The user's choice is influenced not only by the actual values of specific parameters, but also by their perception by individuals who make travel decisions. To increase the popularity of public transport, it is necessary to understand which parameters are most important for its existing and potential users. The paper analyzes six key criteria that characterize a trip by public transport: trip duration, waiting time, walking time to reach a stop, fare, comfort of the journey, and the need for a transfer. The methodological basis of the study is the Best-Worst Method, which allows for setting the weights of the criteria based on the previous ranking of these criteria by the transport system users.

Initial data for the study were collected through surveys in Lviv. Based on the analysis of respondents' answers, it was found that the most significant influence on the choice of public transport is the comfort of the trip as a complex indicator that takes into account the occupancy of the vehicle interior, the comfort of seats, the temperature in the cabin, the presence of a low floor, etc. This indicates the importance of the quality of vehicle types for passengers at the current development stage of the Lviv public transport system. The obtained value of the coefficient of consistency confirms the high reliability of the results. There is a connection between the level of comfort and the perception of travel time: with low comfort, passengers focus more on the duration of the trip, while in cities with a developed transport system, waiting time, transfers, and accessibility are more critical. The results of the study can help formulate policies to increase the attractiveness of public transport.

Key words: *modal split, mode choice, urban mobility, public transport, Best-Worst method.*

УДК 656.073.7:519.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/44

Гнідой Р.І.
Одеський національний морський університет

ПРИКЛАДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ОБСЯГУ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВНУТРІШНІМ ВОДНИМ ТРАНСПОРТОМ

Дослідження обґрунтування перспективного обсягу перевезень внутрішнім водним транспортом (ВВТ) є надзвичайно важливим для подальшого розвитку транспортної інфраструктури України. Особливе значення воно набуває у контексті збільшення ефективності цих перевезень з використанням внутрішніх водних шляхів. Україна недостатньо використовує свій потенціал, що безумовно впливає на стан промисловості та сільськогосподарської сфери. Основною метою цієї роботи є створення науково-методичних положень щодо адекватної оцінки обсягу транспортної роботи підприємств ВВТ.

У роботі проаналізовано існуючі науково-практичні підходи до прогнозування. Встановлено, що статистичні методи дозволяють визначити закономірності і тренди, які спостерігаються в динаміці обсягів перевезень. Натомість методи експертних оцінок дозволяють враховувати фактори, які не піддаються повноцінному статистичному вимірюванню. У першу чергу це стосується політичної стабільності, технологічних інновацій чи соціальних змін. Усі вони безпосередньо впливають на розвиток внутрішнього водного транспорту. Запропоновано синтез вказаних вище методів, що поєднує їх переваги та спростовує недоліки. Теоретичний матеріал проілюстровано на прикладі прогнозування обсягів перевезень експортного зерна, яке є одним із бюджетоутворюючих джерел України. Це дозволяє зрозуміти не лише загальні об'єми транспортної роботи, а й оцінити вимоги до портових потужностей, флоту та інфраструктури внутрішніх водних шляхів. Серед показників, на які необхідно зважати, розглядається насамперед обсяг та структура тоннажу, ступінь розвитку відповідної інфраструктури для забезпечення ефективності водних перевезень. Це, безумовно, забезпечить виконання вимог промисловості та сільського господарства і відобразиться на ефективності морсько-господарського комплексу країни.

У роботі також проаналізовано фактори підвищення експлуатаційно-економічного ефекту, які можуть бути досягнуті за рахунок отримання достовірної та своєчасної інформації щодо обсягів транспортної роботи підприємств ВВТ. Вона, у свою чергу, забезпечить ріст пропускної спроможності портів та провізної – флоту, раціональне використання існуючих потужностей та процедур, сприятиме зниженню витрат на транспортування та покращенню якості обслуговування клієнтів. Таким чином, прогнозування обсягів перевезень не лише допомагає визначити майбутні потреби в технічному забезпеченні транспортування, а й сприяє підвищенню ефективності управлінських рішень у логістичній сфері.

Важливим результатом дослідження є синтез імовірнісно-статистичних та експертних методів формування адекватних рішень. Подібне об'єднання методів проявляє синергетичний ефект при проведенні оцінки перспектив розвитку транспортних процесів і систем. У свою чергу, експертні оцінки дають змогу врахувати такі фактори, як зміни в економічній ситуації, технологічні новації, соціальні та політичні чинники, що безпосередньо впливають на розвиток ВВТ.

Таким чином, результати цього дослідження мають ключове та найважливіше значення для стратегічного планування та подальшого розвитку водного транспорту в Україні. Вони дають змогу не лише оцінити потенційні обсяги перевезень на найближчі роки, але й передбачити необхідність інвестицій у розвиток інфраструктури водних шляхів, модернізацію портів та закупівлю нового флоту. Крім того, прогнози допоможуть удосконалити систему управління перевезеннями, зменшити витрати та підвищити ефективність роботи державних контролюючих органів і портових операторів.

Ключові слова: *транспортні технології, перевезення, внутрішній водний транспорт, флот, порти, прогнозування, синтез методів, обґрунтування рішень.*

Постановка проблеми. Внутрішній водний транспорт є важливою складовою транспортної інфраструктури більшості країн світу. Він забезпечує ефективне переміщення вантажів між різними регіонами держави, а також переміщення експортно-імпортних вантажів. В Україні внутрішні водні шляхи мають значний потенціал для розвитку. На її території простягаються водні шляхи таких великих річок, як Дніпро, Дністер, Дунай, Південний Буг та інші. Однією із найважливіших складових, що створюють бюджет держави, є експорт зерна. Однак, попри наявність значних ресурсів, ефективний потенціал внутрішніх водних шляхів залишається нереалізованим. Це пов'язано з неефективним управлінням перевезеннями, обмеженою інфраструктуру та застарілим флотом.

Проблема обґрунтування перспективного обсягу перевезень внутрішнім водним транспортом є ключовою для розробки стратегії розвитку цієї сфери державної діяльності. Відсутність достовірних прогнозів, які би враховували всі фактори, що впливають на розвиток ВВТ, обмежує можливості для стратегічного планування, інвестування в інфраструктуру та підвищення ефективності перевезень. Крім того, нестабільність економічної ситуації та постійні зміни в міжнародній політиці потребують адаптації та розвитку існуючих підходів до нових умов. Це робить актуальним створення окремої сукупності операцій та послідовності їхнього виконання, які поєднують статистичні та експертні підходи.

Зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Аналіз існуючих підходів та методів прогнозування показав, що кожен з них має свої переваги та недоліки. Також має місце складність їх практичного використання, так як усі вони потребують спеціальних знань у галузі економічних та ймовірнісно-статистичних методів. Саме тому створення складу і послідовності операцій (методичних положень), орієнтованих на практичне використання, є метою наведених у статті результатів.

Розв'язання цієї проблеми має безпосереднє значення як для наукових досліджень, так і для практичного застосування в галузі транспорту та логістики. З наукової точки зору, розробка точних моделей прогнозування обсягів перевезень внутрішнім водним транспортом вимагає створення синергії таких методів як ймовірнісно-статистичних моделей та експертних. Це дозволить врахувати соціальні, економічні та політичні фактори, які можуть суттєво вплинути на динаміку перевезень.

З практичної точки зору, розв'язання цієї проблеми є також важливим для вдосконалення управлінських рішень у сфері водного транспорту. Прогнозування обсягів перевезень дозволяє забезпечити баланс між попитом та пропозицією транспортних послуг, оптимізувати використання існуючих ресурсів, зокрема потужностей порту і флоту. Це безумовно сприяє зменшенню витрат на транспортування вантажів. Завдяки цьому можна розробити рекомендації стосовно інвестування в модернізацію інфраструктури та технічного переоснащення флоту, що є необхідним для підвищення конкурентоспроможності ВВТ на внутрішньому та міжнародному ринках.

Таким чином, обґрунтування перспективного обсягу перевезень внутрішнім водним транспортом є важливим науковим завданням, яке має безпосередній вплив на ефективність економічних процесів в Україні та на міжнародні торгівельні відносини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом в Україні зросла увага до розвитку внутрішнього водного транспорту, який має великий потенціал для ефективного перевезення вантажів, зокрема зернових, що є одним із основних експортних товарів країни. Відповідно, дослідження, спрямовані на прогнозування обсягів перевезень та керування внутрішніми процесами, набувають великого значення для подальшого розвитку цієї сфери.

У галузі стратегічного планування та розвитку внутрішнього водного транспорту (ВВТ) застосування математичних методів є ключовим для обґрунтування управлінських рішень.

Однією з основних проблем стратегічного планування у сфері водного транспорту є прогнозування обсягів перевезень. У науковій літературі розглядаються різноманітні підходи до цієї проблеми. Більшість досліджень зосереджені на окремому використанні ймовірнісно-статистичних моделей або експертних оцінок. Так, Ільченко С.В. у своїй роботі [1] застосував економіко-математичне моделювання для підвищення конкурентоспроможності водного транспорту України, використовуючи ентропійну функцію цілі. Проте, його дослідження зосереджене переважно на оптимізації логістичних потоків, без розробки прогнозів обсягів перевезень та без залучення експертного підходу. Сілантьєва Ю. [2] аналізує процеси доставки

вантажів у змішаному сполученні, розглядаючи аспекти логістичної адаптації, однак математичні методи прогнозування у її дослідженні не застосовуються. У роботі не представлено формалізованих моделей, що дозволяють оцінити обсяги перевезень водним транспортом у динаміці. Прокудін Г.С. [3] досліджує прогнозування транспортних потоків на прикладі переміщення через митні пункти пропуску. Автори використовують методи регресійного аналізу, проте їх підхід не охоплює експертні фактори, що значно обмежує можливості врахування невизначеності та нестабільності середовища. Каплун А. [4] досліджує ринкову рівновагу у вантажних перевезеннях з використанням математичного моделювання. У його роботі застосовуються класичні економічні моделі попиту і пропозиції, проте відсутній прогнозний аналіз динаміки перевезень у сфері водного транспорту.

Із англомовних джерел слід відзначити роботу Ф. Нур [5], у якій запропонована стохастична модель оптимізації функціонування портів внутрішнього водного транспорту. Її підхід є математично глибоким, однак не поєднується з якісними експертними оцінками, що є критично важливим у нестабільному середовищі. У свою чергу, у роботі Х. Юан і співавт. [6] представлено метод оптимізації маршрутів ВВТ на основі даних AIS, де застосовано математичні моделі, проте завдання стратегічного прогнозування обсягів перевезень не розглядається. Л. Берріо [7] досліджує пасажирські перевезення на річці Магдалена в Колумбії за допомогою транспортних моделей, однак підхід не включає жодних методів статистичного аналізу чи експертного узагальнення для вантажних перевезень.

Таким чином, наведений огляд наукових праць свідчить, що існуючі дослідження зосереджуються або на математичному аналізі, або на експертних оцінках, але не поєднують ці два методи одночасно. У цьому контексті, запропонований у роботі синтез статистичного прогнозування та експертної оцінки забезпечує об'єднання переваг кожного з цих підходів з нівелюванням їх недоліків. Поряд з цим створюється синергетичний ефект від цього поєднання. Це, безумовно, забезпечує достовірність і якість отриманих прогнозів, новизну та ширші можливості у формуванні стратегічного бачення розвитку ВВТ.

Постановка завдання. Метою дослідження є створення науково-методичних положень щодо встановлення перспективного обсягу транспортної роботи ВВТ. Особливу увагу приділено можливості практичного застосування отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. Прогнозування обсягів перевезень внутрішнім водним транспортом є важливим інструментом стратегічного планування у сфері логістики та транспортної інфраструктури. У сучасній практиці особливе значення надається методам аналізу часових рядів, які дозволяють виявити наявні тенденції, сезонність і закономірності зміни досліджуваного показника. Прогнозування динаміки обсягів перевезень базується на гіпотезі про те, що виявлені в минулому тренди будуть зберігатися в майбутньому.

З-поміж наявного інструментарію математичного прогнозування ефективним є застосування методів функціонального моделювання, які передбачають побудову рівнянь тренду з найкращою відповідністю до наявного емпіричного ряду. Такий підхід забезпечує аналітичне представлення залежності між роками (або іншими часовими інтервалами) та обсягом перевезень, що дає змогу здійснювати екстраполяцію отриманої моделі в межах прогнозного періоду.

Проведений огляд існуючих моделей екстраполяції дозволяє виявити основні підходи до опису динаміки економічних і транспортних процесів, зокрема зміни обсягів перевезень у часі. Встановлено, що найбільш поширеними функціональними формами є лінійна, поліноміальна (другого ступеня), ступенева, логарифмічна та експоненціальна моделі. Вони реалізуються у загальнодоступному математичному програмному забезпеченні та широко використовуються в аналітиці транспортних систем.

Лінійна модель є найпростішою формою регресії, яка передбачає сталу швидкість зміни показника. Її перевагою є легкість побудови та інтерпретації, проте вона малопридатна для випадків, коли динаміка змінюється нерівномірно, або має фазові переходи.

Поліноміальна модель другого ступеня дозволяє описати вигнуті тренди, включаючи прискорення або уповільнення зростання. Основною її перевагою є здатність моделювати змінні темпи розвитку, проте така модель схильна до переадаптації та може бути нестабільною при прогнозуванні за межами наявного ряду.

Ступенева модель використовується у випадках, коли зміна показника відбувається пропорційно до певного ступеня незалежної змінної. Вона є корисною для опису економічних і технологічних залежностей, однак потребує

логарифмічного перетворення даних та не завжди забезпечує високу точність.

Логарифмічна модель є доцільною, коли спостерігається швидке зростання на початку періоду з подальшим вирівнюванням. Вона особливо ефективна для опису насичуваних процесів або систем зі зниженням граничної продуктивності.

Експоненціальна модель застосовується для процесів з прискореним зростанням. Вона є математично обґрунтованою для багатьох біологічних і фінансових процесів, проте погано узгоджується з системами, що демонструють стабілізацію або коливання.

Для порівняння зазначених моделей використано фактичні дані обсягів експорту зерна за 2012–2024 роки. З цих даних побудований початковий динамічний ряд, що наведений на рис. 1. Далі створено відповідні трендові рівняння та обчислено коефіцієнти детермінації, що характеризують ступінь відповідності моделі емпіричним даним (табл. 1).

Найвищу тісноту зв'язку продемонструвала ступенева модель ($R^2 = 0{,}783$), що свідчить про її потенціал для опису змінної динаміки. Логарифмічна модель виявилась другою за точністю ($R^2=0{,}732$), перевершуючи поліноміальну модель другого порядку, експоненціальну та лінійну. Проте, незважаючи на не найвищу кореляцію, саме логарифмічна функція використана в даній роботі для подальшого прогнозування.

Цей вибір зумовлений низкою практичних та теоретичних міркувань. По-перше, логарифмічна модель краще відображає природу процесу, у якому темпи зростання обсягів перевезень сповільнюються внаслідок обмеженої інфраструктурної ємності. По-друге, вона забезпечує аналітичну стійкість при екстраполяції, тоді як поліноміальні функції за межами наявного ряду можуть призводити до нефізичних (наприклад, від'ємних) значень. Нарешті, побудований за логарифмічною моделлю довірчий інтервал узгоджується з оцінками експертного прогнозування, що забезпечує цілісність застосованого підходу.

Логарифмічна модель дозволяє точно описати нелінійний характер зростання досліджуваного показника та забезпечує прийнятний рівень достовірності апроксимації. Загальний вигляд функції, що використовується для опису логарифмічного тренду, подається у такій формі:

$$y_t = a \cdot \ln(x_t) + b \qquad (1)$$

y_t – значення показника (обсяг експорту зерна),

x_t – спостережуване значення, порядковий номер періоду (рік),

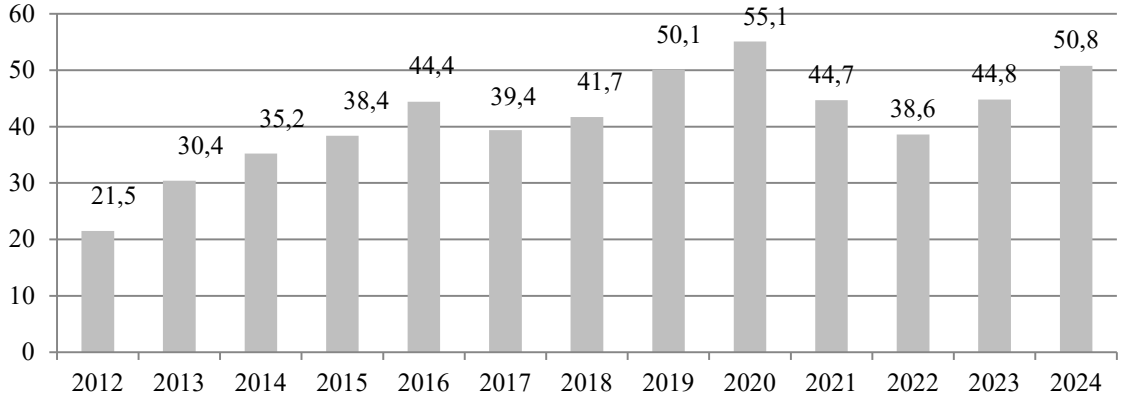


Рис. 1. Початковий динамічний ряд (експорт зерна, млн. т.)

Таблиця 1

Типи моделей екстраполяції

№	Тип	Функціональна залежність	Формула	Тіснота зв'язку
1	експоненціальна	y = ae(bx)	y = 28.83e0.0472x	R2 = 0.557
2	лінійна	y = ax+b	y = 1.7165x + 29.146	R2 = 0.559
3	логарифмічна	y = aln(x) + b	y = 9.9915ln(x) + 23.828	R2 = 0.732
4	поліноміальна	y = ax2 + bx +c	y = -0.2959x2 + 5.8591x + 18.79	R2 = 0.722
5	ступенева	y = axb	y = 24.484x0.2847	R2 = 0.783

a – коефіцієнт, що визначає нахил лінії тренду та швидкість зміни величини *y* щодо *x*,

b – константа, що визначає перетин лінії тренду з віссю *y*.

Цей підхід особливо корисний, коли дані підкоряються зростаючим або зменшуваним темпам, які, однак, не є постійними, а поступово стабілізуються чи прискорюються.

З метою прогнозування формується функціональний опис тренду у формі логарифмічної кривої (рис. 2).

Для динамічного ряду|лави,низки| критерій максимуму значення достовірності апроксимації має величину значно більшу ніж 0,5 (R^2 = 0.732), що свідчить про достатню якість моделі для подальшого використання в прогнозних цілях. Ця модель (2) і приймається для проведення прогнозування.

$$y = 9.9915\ln(x) + 23.828 \quad (2)$$

Для формування вихідних даних, з метою подальшого проведення експертної оцінки, розраховані прогнозні значення об'єму експорту зерна (y_i), величини дисперсії (σ^2) і стандартного відхилення (σ), які наведені в табл. 2.

На основі логарифмічної функції тренду здійснюється розрахунок прогнозних значень обсягу

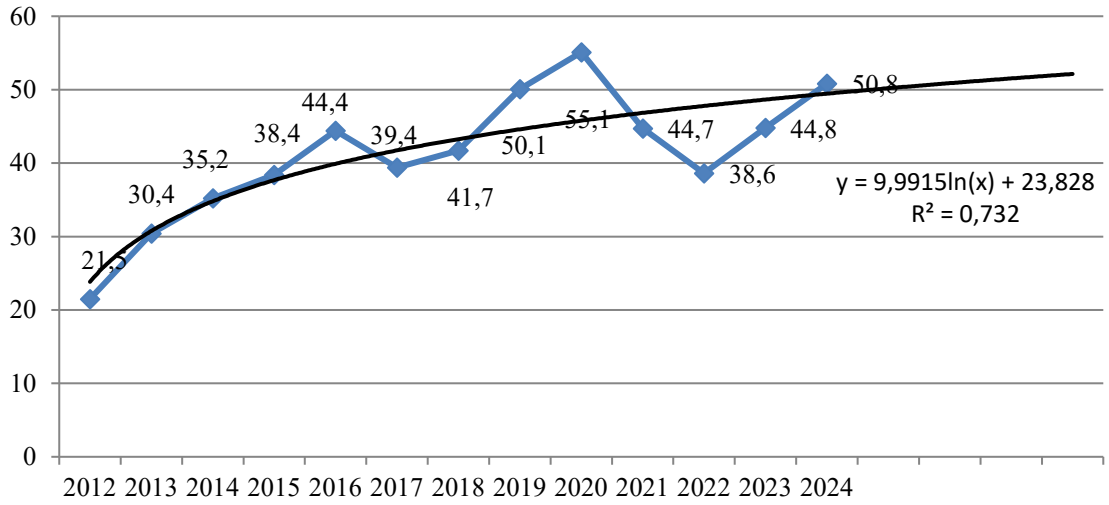


Рис. 2. Логарифмічний тип тренду

Таблиця 2

Розрахунки прогнозного об'єму експорту зерна

Роки	y'_i	y_i	y_i y'_i	$(y_i$ $y'_i)^2$	σ^2	σ
2012	23,83	21,5	-2,33	5,42	25,694	5,069
2013	30,75	30,4	-0,35	0,13		
2014	34,80	35,2	0,40	0,16		
2015	37,68	38,4	0,72	0,52		
2016	39,91	44,4	4,49	20,17		
2017	41,73	39,4	-2,33	5,43		
2018	43,27	41,7	-1,57	2,47		
2019	44,60	50,1	5,50	30,20		
2020	45,78	55,1	9,32	86,83		
2021	46,83	44,7	-2,13	4,56		
2022	47,79	38,6	-9,19	84,39		
2023	48,66	44,8	-3,86	14,87		
2024	49,46	50,8	1,34	1,81		
2025	50,20					
2026	50,89					
2027	51,53					
2028	52,14					

експорту зерна на період до 2028 року. Результати обчислень наведено у відповідній таблиці. У процесі аналізу також обчислюється дисперсія (σ^2 = 25,694) та стандартне відхилення (σ = 5,069), які слугують основою для визначення інтервалів довіри.

Побудова інтервального прогнозу дозволяє оцінити рівень невизначеності моделі та сформувати довірчий інтервал, у межах якого очікується реальне значення показника. Такий підхід є особливо важливим у транспортному прогнозуванні, де на результат впливають численні зовнішні чинники – політичні, економічні, кліматичні.

У дослідженні отримано прогнозне значення обсягу експорту зерна у 2028 році на рівні Y_{28} = 52,14 млн. т, відповідно довірчий інтервал становить 47,07–57,21 млн. т, що свідчить про відносну стабільність прогнозу в межах розрахованої похибки.

З метою підвищення адекватності до майбутніх умов та врахування факторів, які не можуть бути повністю відображені статистичними методами, у дослідженні використано метод експертного оцінювання. Методичні рекомендації щодо проведення експертизи базуються на методі «Дельфі» з урахуванням особливостей об'єкта дослідження. Цей підхід дозволяє отримати професійну думку фахівців щодо перспектив розвитку галузі, зокрема щодо можливих значень обсягу експорту зерна у прогнозному періоді. Врахування думок експертів дає змогу охопити чинники політичного, технологічного, економічного та ринкового характеру, які складно формалізувати у вигляді математичної моделі.

Очікуваний обсяг експорту зерна в 2028 році визначається інтервалом 47,07–57,21 (млн.т), (Y_{28} = 52,14 (млн. т) – точковий прогноз).

Проведений прогноз об'ємів експорту і попередній аналіз дозволили сформувати для експертної оцінки 5 діапазонів, які представлені в табл. 3.

Склад чинників, по яких оцінюватиметься об'єм експорту зерна в 2028 р., включає: Технічний ($К_1$); Технологічний ($К_2$); Економічний ($К_3$); Маркетинговий ($К_4$); Політичний ($К_5$).

Для участі в експертизі залучаються компетентні фахівці. При їх відборі дотримуються положення щодо однакової кількості експертів ($Е_1$ $Е_5$) по кожному напрямку (складу чинників): $Е_1$; $Е_2$; $Е_3$; $Е_4$; $Е_5$.

Експертами за десятибальною шкалою визначена ваговитість кожного з відібраних критеріїв. Результати проведення першого етапу експертизи приведені в табл. 4.

Результати оцінки (від 0 до 10) занесені у верхній лівий кут кожної клітки таблиці. Потім їх значення множаться на величини відповідних коефіцієнтів ваговитості і отримані результати вказуються в середній частині клітки. Далі визначаються суми середніх частин рядків, величина яких визначила ступінь вірогідності діапазону вантажопереробки.

Для узагальнення думок окремих експертів складається звідна таблиця (табл. 9) і по ній визначений найбільш вірогідний діапазон вантажопереробки в 2028 р.

Таблиця 3

Діапазонів вантажопереробки, млн. т

Діапазон	$Д_1$	$Д_2$	$Д_3$	$Д_4$	$Д_5$
Значення	менше 42	42–47	47–57	57–62	більше 62

Таблиця 4

Критерії оцінки

Експерти	Критерії оцінки об'єму вантажопереробки					Разом
	$К_1$	$К_2$	$К_3$	$К_4$	$К_5$	
$Е_1$	9	8	10	8	9	44
$Е_2$	9	9	10	9	10	47
$Е_3$	8	7	9	7	10	41
$Е_4$	10	8	9	8	10	45
$Е_5$	9	8	10	9	10	46
Разом	45	40	48	41	49	223
$С_j$	0,2	0,18	0,22	0,18	0,22	1

Як видно з табл. 4, експерти основну перевагу віддали політичному критерію, вважаючи, що саме нестабільність економічної політики є визначальним чинником, котрий впливає на перспективи розвитку виробництва і зокрема вантажопереробки.

На другому етапі кожен експерт заповнив власну анкету шляхом чисельної оцінки діапазонів вантажопереробки залежно від чинників $К_1$ – $К_5$. Наведено розрахунки для Експерта $Е_1$ у табл. 5.

Аналогічним чином створюються анкети для Експертів 2–5.

Далі формується узагальнена таблиця, що включає бали Експертів $Е_{1-5}$ по діапазонах $Д_{1-5}$. Завдяки ній можна зрозуміти, якому саме діапазону експерти дали найвищу оцінку.

Як видно з приведених у табл. 6 підсумкових результатів, найбільш вірогідним, на думку експертів, діапазоном експорту зерна у 2028 р. є $Д_4$ (57–62 млн. т).

У результаті досягається узгодження між даними математичного прогнозування та судженнями фахівців, що в сукупності підвищує надійність отриманого стратегічного прогнозу для потреб внутрішнього водного транспорту.

Такий підсумок отримано на основі багатокритеріального аналізу, який поєднує статистичну модель та зважені експертні оцінки. Це дозволяє мінімізувати вплив викривлень окремих джерел даних і дозволяє врахувати складові, що не піддаються кількісному виміру (наприклад, політичні або інституційні ризики). У результаті формується сценарій прогнозу, який має прикладну цінність для планування використання портових потужностей, завантаження флоту, організації перевезень і обґрунтування інвестиційних рішень.

Отримані оцінки створюють базу для економічно обґрунтованого управління транспортною інфраструктурою, зменшення ризиків перевантаження або недовантаження об'єктів логістики, своєчасного розрахунку потреби в судновому складі, а також оптимізації витрат, пов'язаних з інфраструктурною підготовкою. Таким чином, економічний ефект полягає в підвищенні

Таблиця 5

Анкета експерта $Е_1$

Діапазон	Критерії оцінки об'єму вантажопереробки, коефіцієнти їх ваговитості ($С_j$)					Разом
	$К_1$	$К_2$	$К_3$	$К_4$	$К_5$	
	0,2	**0,18**	**0,22**	**0,18**	**0,22**	
$Д_1$	4	4	3	4	3	3,56
	0,8	0,72	0,66	0,72	0,66	
$Д_2$	6	6	5	6	5	5,56
	1,2	1,08	1,1	1,08	1,1	
$Д_3$	8	8	9	8	9	8,44
	1,6	1,44	1,98	1,44	1,98	
$Д_4$	9	9	10	9	10	9,44
	1,8	1,62	2,2	1,62	2,2	
$Д_5$	8	9	9	9	10	9,02
	1,6	1,62	1,98	1,62	2,2	

Таблиця 6

Узагальнення думок експертів

Діапазон	Експерти					Разом
	$Е_1$	$Е_2$	$Е_3$	$Е_4$	$Е_5$	
$Д_1$	3,56	4,74	4,98	5,78	4,78	23,84
$Д_2$	5,56	6,38	6,62	7,4	6,4	32,36
$Д_3$	8,44	9	8,8	9	9	44,24
$Д_4$	9,44	10	9,44	10	10	48,88
$Д_5$	9,02	9,44	9,58	9,6	9,62	47,26

ефективності управлінських рішень та скороченні витрат на транспортування і логістичне забезпечення.

Результати проведеного дослідження свідчать про доцільність використання синтезованого підходу до прогнозування обсягів перевезень внутрішнім водним транспортом, який базується на поєднанні статистичного аналізу та експертного оцінювання. Такий підхід забезпечує вищу гнучкість та адаптивність моделі до умов нестабільного ринкового середовища та обмеженої достовірної статистики.

Отримані прогнозні значення (зокрема, очікуваний обсяг експорту зерна в 2028 році на рівні 52,14 млн т) і підтвердження його вірогідності з боку експертного оцінювання (перевага за діапазоном 57–62 млн т) створюють надійну основу для:

– стратегічного планування перевезень на внутрішніх водних шляхах;

– розрахунку потреби в тоннажі флоту та завантаженні інфраструктури;

– формування інвестиційних програм у сфері портової логістики;

– визначення обґрунтованих норм завантаження перевалочних потужностей.

Особливо важливо підкреслити, що використання лише одного з методів – статистичного або експертного – не забезпечує такої повноти охоплення чинників. Саме їх поєднання дозволяє компенсувати обмеження кожного з підходів, що в умовах обмеженої інформації та складної політико-економічної ситуації є критично важливим для галузі водного транспорту.

Таким чином, запропонована та проілюстрована методика може бути рекомендована як основа для прогнозування інших транспортних потоків, що відзначаються значною волатильністю, а також для оцінки сценаріїв розвитку логістичної системи країни.

Застосування синтезованого підходу до прогнозування обсягів перевезень внутрішнім водним транспортом забезпечує економічний ефект за рахунок зниження втрат від неефективного управління логістичними ресурсами. Установлення достовірного прогнозу обсягів експортних перевезень зерна дозволяє:

– завчасно планувати завантаження портової інфраструктури, уникаючи простоїв, резервування зайвих потужностей або створення «вузьких місць»;

– забезпечити ефективне розміщення та використання флоту внутрішнього водного транспорту, виходячи з очікуваного обсягу перевезень;

– скоротити витрати на експлуатацію портів та суден шляхом узгодженого планування обробки вантажопотоків;

– зменшити втрати на зберігання зерна та черги на перевалку завдяки точному погодженню перевезень з логістичними вікнами;

– підвищити якість, швидкість та адекватність прийнятих рішень щодо модернізації інфраструктури та обґрунтування інвестицій у внутрішній водний транспорт.

Висновки. Внутрішній водний транспорт України має великий потенціал для розвитку, зокрема в сфері перевезень зернових вантажів, що складають значну частину експортних товарів країни. Однак для максимізації ефективності використання водних шляхів необхідно вирішити низку проблем, пов'язаних з модернізацією інфраструктури, оновленням флоту та оптимізацією логістичних процесів. Прогнозування обсягів перевезень є важливим інструментом для визначення потреби у розвитку транспортної інфраструктури та флоту, а також для оптимізації управління перевезеннями.

На відміну від класичних підходів, які базуються лише на ретроспективній статистиці, синтез статистичної моделі з експертними оцінками дозволяє враховувати нерегулярні впливи (політичні, технологічні, ринкові), які суттєво позначаються на плануванні транспортних операцій. Це забезпечує більш стабільне управління ресурсами, знижує ризики недовантаження або перевантаження, а також створює передумови для зменшення операційних витрат та збільшення пропускної здатності логістичних вузлів.

Прогнозна модель може бути використана як інструмент економічного управління, який дозволяє підвищити загальну ефективність функціонування внутрішнього водного транспорту в умовах обмеженого ресурсного забезпечення.

Розглянуті аспекти прогнозування дозволяють сформулювати наступні твердження:

1. Методи прогнозування на основі статистичного аналізу найбільш ефективні в умовах великого об'єму початкової статистичної інформації.

2. Експертні методи припускають можливість використовувати практичний досвід і знання (евристики фахівців-експертів) для створення баз знань з метою вирішення важко формалізованих завдань. База знань здатна підтримувати міркування експертів при сумнівних (нечітких, неточних) даних.

3. Загалом, поєднання методів статистичного і експертного прогнозування може дозволити подолати відмічені вище труднощі в оцінці економічних показників при вирішенні завдань стратегічного планування.

Отримані результати створюють базу для подальших досліджень у напрямі оптимізації транспортної логістики, модернізації інфраструктури ВВТ та формування сценаріїв сталого розвитку водного транспорту України.

Список літератури:

1. Ільченко С.В., Грищенко В.Ф., Грищенко І.В. Інституціонально-економічні механізми забезпечення конкурентоспроможності водного транспорту України / С.В. Ільченко та ін. Одеса : Інститут економіки та прогнозування НАН України. 2024. Наукові результати відділу ринку транспортних послуг. URL: https://impeer.org.ua

2. Сілантьєва Ю. Моделювання процесу доставки вантажів у змішаному сполученні / Ю. Сілантьєва / *Транспортні системи і технології.* 2024. № 2. С. 143–178. URL: https://surl.li/oteqmn

3. Прокудін Г.С., Мельников І.А., Поляк П.К. Прогнозування переміщення автотранспортних засобів через митний кордон України / Г.С. Прокудін та ін. / *Технічні науки та технології.* 2025. № 1. С. 301–308. URL: https://surl.li/xwugll

4. Каплун А.Е. Економіко-математичне моделювання ринкової рівноваги на ринку вантажних транспортних перевезень / А.Е. Каплун. Магістерська дисертація. Київ: НТУУ «КПІ», 2018. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23677/1/Kaplun_magistr.pdf

5. Nur F. Developing models and algorithms to design a robust inland waterway transportation network under uncertainty / F. Nur. Mississippi State University, 2020. URL: https://scholarsjunction.msstate.edu/td/1376/

6. Yuan X., Wang J., Zhao G., Wang H. Comprehensive Study on Optimizing Inland Waterway Vessel Routes Using AIS Data / *Journal of Marine Science and Engineering.* 2024. Vol. 12, No. 10. URL: https://www.mdpi.com/2077-1312/12/10/1775

7. Berrio L., Cantillo V., Arellana J. Strategic modelling of passenger transport in waterways: The case of the Magdalena River / Transport. 2019. Vol. 34, No. 2. P. 215–224. URL: https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/download/8943/8138

Hnidoi R.I. APPLIED RESEARCH TO JUSTIFY THE PROSPECTIVE VOLUME OF INLAND WATERWAY TRANSPORT

The justification of the prospective volume of inland waterway transport (*IWT*) *is critically important for the further development of Ukraine's transport infrastructure. This issue becomes particularly relevant in the context of increasing the efficiency of freight flows using inland waterways. Ukraine currently underutilizes its water transport potential, which directly affects the state of industry and agriculture. The main objective of this study is to develop scientific and methodological provisions for an adequate assessment of the transport work performed by IWT enterprises.*

The paper analyses existing scientific and practical approaches to forecasting. It is established that statistical methods make it possible to identify regularities and trends in the dynamics of freight volumes. In contrast, expert evaluation methods enable consideration of factors that cannot be fully captured through statistical measurement – such as political stability, technological innovation, and social transformation. These factors have a significant influence on the development of inland navigation. The study proposes a synthesis of both approaches, combining their advantages while compensating for their limitations. The theoretical framework is illustrated using the case of forecasting grain export volumes – one of Ukraine's key budget-forming components. This allows not only an assessment of overall transport work but also an evaluation of the requirements for port capacities, fleet characteristics, and inland waterway infrastructure. Particular attention is given to such indicators as fleet tonnage and the condition of the supporting infrastructure, which are crucial to ensuring the efficiency of inland waterborne transport. Improvements in these areas will meet the needs of industry and agriculture and positively impact the performance of Ukraine's maritime-economic complex.

The study also analyses factors that contribute to operational and economic effectiveness, which can be achieved through timely and reliable information about the transport activity of IWT enterprises. This, in turn, will ensure greater port throughput, rational fleet utilization, improved use of existing capacities and procedures, and lower transportation costs – thereby improving customer service quality. Thus, forecasting transport volumes not only helps anticipate technical needs in future logistics operations but also supports more effective management decisions in the field of transport logistics.

An important result of this research is the synthesis of probabilistic-statistical and expert methods for decision support. The combination of these tools creates a synergistic effect when assessing the development

prospects of transport systems and processes. Expert input, in particular, helps account for external factors such as shifts in the economic environment, technological change, and socio-political dynamics – all of which directly influence inland waterway development.

In summary, the results of this study are of critical importance for strategic planning and the further advancement of water transport in Ukraine. The findings provide a basis for evaluating the expected freight volumes in the coming years, forecasting the need for investment in waterway infrastructure, port modernization, and fleet renewal. In addition, the proposed forecasting framework will support improvements in transport management systems, cost reduction, and greater efficiency of regulatory authorities and port operators.

Key words: *transport technologies, freight transport, inland waterway transport, fleet, ports, forecasting, method synthesis, decision support.*

УДК 621.869.888
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/45

Ловська А.О.
Український державний університет залізничного транспорту

Мурад'ян А.О.
Одеський національний морський університет

Демидюков О.В.
Одеський національний морський університет

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ КОНТЕЙНЕРА ТИПУ ХОПЕР ПРИ ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ

В матеріалах статті висвітлено особливості конструкції контейнера типу хопер, а також визначення його міцності при вантажно-розвантажувальних операціях. Контейнер має похилі торцеві стіни, а його підлогу утворено кришками розвантажувальних люків. Такі конструкційні особливості контейнера дозволяють здійснювати розвантаження вантажу із нього самотечією. Також контейнер можливо розвантажувати із використанням схеми «постановка на ребро».

Для забезпечення міцності контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях проведено його розрахунок. До уваги прийнято такі схеми навантаження контейнера: підйом за верхні фітинг (стропами або спредером), а також штабелювання. Розрахунок на міцність реалізовано із застосуванням методу скінчених елементів. Його реалізацію здійснено у SolidWorks Simulation. При складанні розрахункової схеми контейнера за умови його підіймання за верхні фітинги стропами враховано, що навантаження від них розкладається на дві складові – вертикальну та горизонтальну, що обумовлено кутом розміщення стропів у просторі. При підйомі контейнера спредером до верхніх фітингів прикладалося вертикальне навантаження. В випадку штабелювання контейнера до верхніх та нижніх фітингів прикладалося вертикальне навантаження. При проведенні розрахунків також враховано дію на контейнер вертикального навантаження від його ваги брутто, а також тиск розпору насипного вантажу на стіни. Скінчено-елементну модель контейнера сформовано тетраедрами. Результати проведених розрахунків дозволили зробити висновок, що міцність контейнера при завданих режимах навантаження дотримується.

Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що міцність контейнера при розглянутих схемах його навантажень дотримується.

Ключові слова: *контейнер типу хопер, вантажно-розвантажувальні операції, навантаженість конструкції, міцність конструкції, контейнерні перевезення.*

Постановка проблеми. Вже тривалий час контейнерні перевезення є найбільш затребуваним видом перевезень вантажів у внутрішньому та зовнішньому сполученні європейських країн. Однією із найголовніших переваг контейнерних перевезення є те, що вони виключають необхідність перевантаження вантажу. Це значно скорочує час його доставки у порівнянні із іншими видами перевезень. Крім того, мобільність контейнера зумовлює можливість його перевезення різними видами транспорту [1, 2]. Наразі в експлуатації знаходиться досить великий сегмент різних за конструкцією контейнерів, які адаптовані до перевезень досить широкої номенклатури вантажів [3, 4]. Враховуючи перспективи розвитку міжнародних перевезень прогнозується зростання попиту на даний вид перевезень.

Одним із найбільш поширених типів вантажів, які перевозяться в контейнерах є насипні. Для їх перевезень застосовуються bulk контейнери (рис. 1). Їх розвантаження частіш за все здійснюється за допомогою підйомно-транспортних засобів. При цьому це вимагає додаткового часу оскільки потребує дотримання спеціальної технології для забезпечення можливості зсипання вантажу під дією гравітаційних властивостей, тобто забезпечення кутового переміщення контейнера.

Для підвищення ефективності перевезень насипних вантажів актуальним є впровадження в експлуатацію спеціальних конструкцій

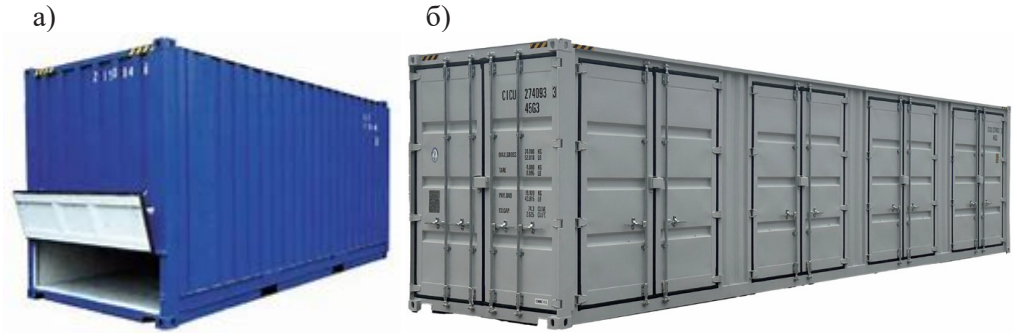


Рис. 1. Bulk контейнери
а) 20-ти футовий; б) 40-футовий

контейнерів, які дозволять пришвидшити розвантажувальний процес. Тому питання створення та впровадження в експлуатацію контейнерів для перевезень насипних вантажів з можливістю їх саморозвантаження є досить актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, присвячені створенню нових конструкцій контейнерів із покращеними технічними характеристиками, є досить поширеними. Так, в публікації [5] запропоновано нову конструкцію контейнера. Особливість конструкції полягає у використанні додаткових вентиляційних вікон у стінах. Наведено відповідне обґрунтування такого рішення. Однак даний контейнер є вузькоспеціалізованим та пристосований до перевезень лише плодоовочевої продукції.

Авторами статті [6] також запропоновано цікаву конструкцію контейнера. Контейнер має підвищене корисне завантаження, що сприяє можливості збільшити об'єм перевозимих у ньому вантажів. Однак авторами не досліджувалась можливість перевезень у даному типі контейнера насипних вантажів.

В роботах [7, 8] досліджено питання зменшення навантаженості контейнера при залізничних перевезеннях впровадженням сендвіч-панелей в його конструкцію. Наведено відповідне обґрунтування використання сендвіч-панелей як обшивки стін контейнера та настилу його підлоги. Разом із цим, широке впровадження такого контейнера в експлуатацію стримується високою собівартістю, що обмежує серійність його виготовлення та використання.

Робота [9] присвячена аналізу конструкційних матеріалів для виготовлення контейнера, призначеного для плодоовочевих вантажів. Встановлено, що найбільш раціональним є використання пластику. Це обґрунтовано легкістю конструкції та впливом на перевозимий вантаж. Разом із цим, виявлення навантаженості такого контейнера при залізничних перевезеннях авторами не проводилось.

В публікації [10] для пришвидшення процесу розвантаження вантажів запропоновано конструкцію контейнера типу хопер. Наведено результати досліджень вертикальної навантаженості контейнера за умови його перевезень вагоном-платформою. Однак в рамках даної статті не проводилися дослідження навантаженості контейнера при інших експлуатаційних режимах.

Проведений аналіз наукових публікацій [5–10] доводить, що створення нових конструкцій контейнерів є важливим та актуальним питанням. Разом із цим, для підвищення ефективності контейнерних перевезень даний напрямок потребує подальшого дослідження.

Метою статті є висвітлення результатів дослідження міцності контейнера типу хопер при вантажно-розвантажувальних операціях. Завданнями, які дозволили досягти даної мети є

– провести визначення міцності контейнера при підйомі за верхні фітинги;

– провести визначення міцності контейнера при штабелюванні.

Виклад основного матеріалу. Для підвищення ефективності перевезень вантажів запропоновано конструкцію контейнера типу хопер, який має похилі торцеві стіни (рис. 2). Підлога контейнера утворена кришками розвантажувальних люків. Наявність похилих стін забезпечує можливість розвантаження контейнера самотечією вантажу із використанням його гравітаційних властивостей. Також контейнер можливо розвантажувати із використанням схеми «постановка на ребро».

Для визначення міцності контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях проведено його розрахунок при таких схемах навантажень: підйом за верхні фітинг, а також штабелювання.

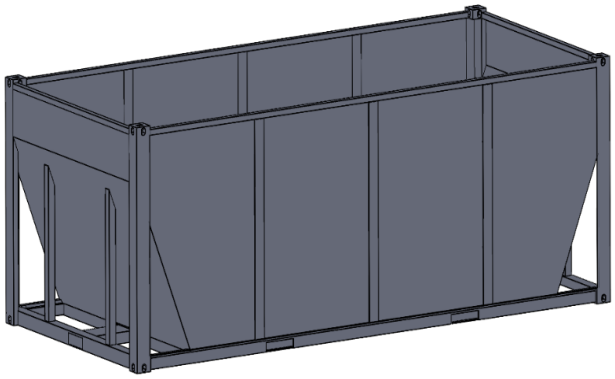


Рис. 2. Контейнер типу хопер

Для завантаження контейнера на транспортний засіб, наприклад, вагон-платформу здійснюється його підйом за чотири верхні фітинги. Для цього на стадії проєктування контейнера відбувається його розрахунок з послідуючим випробуванням дослідного зразка [11]. Дане випробування також здійснюється для перевірки міцності підлоги та рами основи.

Випробування на штабелювання проводять для перевірки можливості контейнера, який повністю завантажений, витримувати навантаження, яке утворюється верхніми завантаженими контейнерами з урахуванням прискорень, що виникають при русу судна з урахуванням наявності ексцентриситету між завантаженими контейнерами у штабелі.

Розрахункові схеми контейнера при зазначених режимах навантаження наведено на рис. 3. Враховано, що при підйомі контейнера стропами, вони розміщуються під кутом 45°. Тому зусилля, яке передається на фітинги через них розкладалося на дві складові – вертикальну та горизонтальну.

Враховано, що на стіни контейнера діє тиск розпору насипного вантажу. У якості вантажу враховано зерно. Тиск розпору визначено за класичною формулою:

$$P = \gamma \cdot g \cdot H \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right), \qquad (1)$$

де γ – щільність насипного вантажу; H – висота стіни; g – прискорення вільного падіння; φ – кут природнього відкосу вантажу.

Для розрахунку контейнера на міцність застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано у SolidWorks Simulation [12, 13]. При цьому сітка створювалась на твердому тілі (рис. 4). Кришки розвантажувальних люків, які утворюють підлогу контейнера, при складанні моделі не враховувалися. Тобто модель включає елементи, які жорстко з'єднані між собою. В якості скінчених елементів застосовано тетраедрами [14, 15]. Скінчено-елементна модель налічує 121529 елементів та 40251 вузол. Матеріалом конструкції призначено сталь марки 09Г2С. Результати розрахунку контейнера наведено на рис. 5–7.

Отже, при підйомі контейнера за верхні фітинги стропами, максимальні напруження в його конструкції зафіксовано в зонах взаємодії

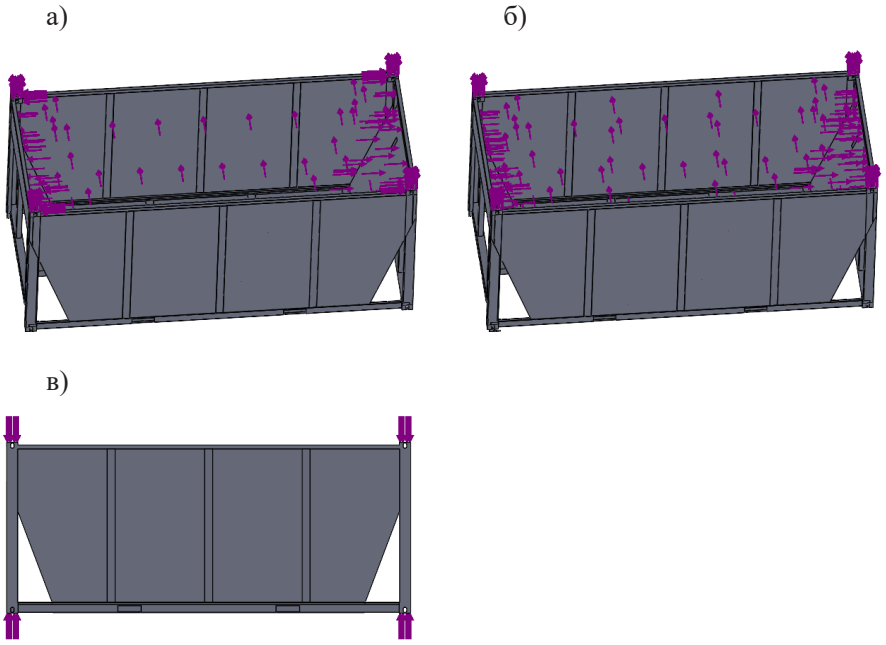


Рис. 3. Розрахункові схеми контейнера типу хопер
а) підйом за верхні фітинги стропами; б) підйом за верхні фітинги спредером; в) штабелювання

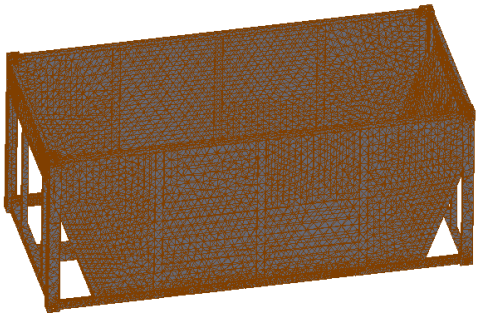


Рис. 4. Скінчено-елементна модель контейнера

а) б)

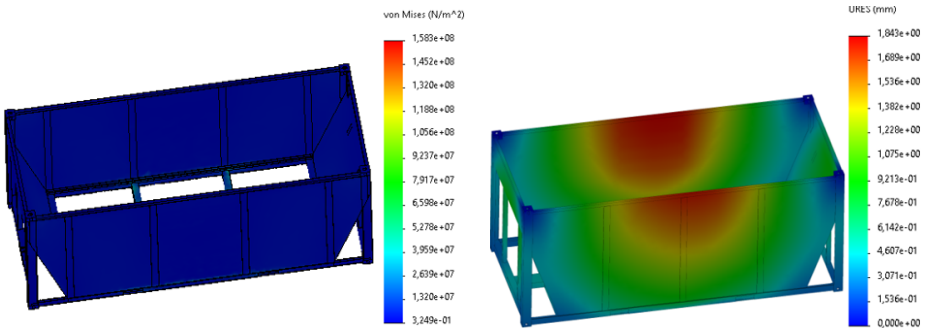


Рис. 5. Результати розрахунку контейнера при підйомі за верхні фітинги стропами а) напружений стан; б) переміщення в вузлах

а) б)

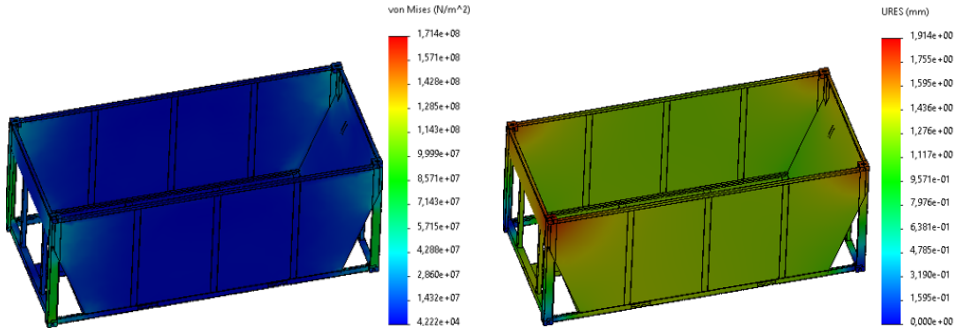


Рис. 6. Результати розрахунку контейнера при підйомі за верхні фітинги спредером а) напружений стан; б) переміщення в вузлах

а) б)

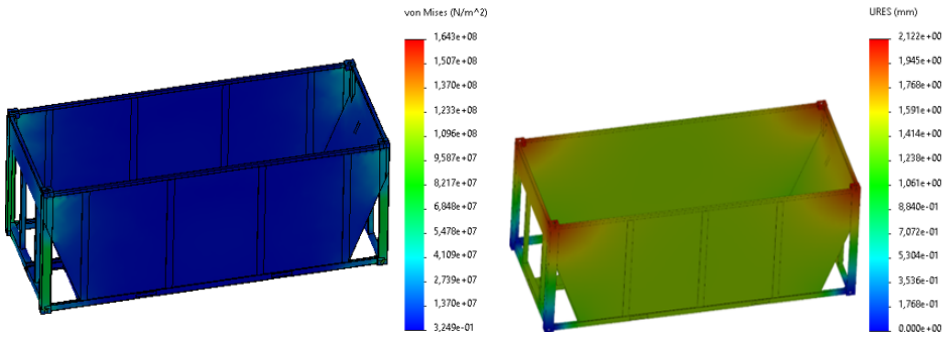


Рис. 7. Результати розрахунку контейнера при штабелюванні а) напружений стан; б) переміщення в вузлах

верхніх фітингів із повздовжніми балками каркаса. Ці напруження склали 158,3 МПа (рис. 5, а)), що нижче за допустимі, які прийнято рівними 210 МПа [16]. Максимальні переміщення мають місце в бокових стінах і складають 1,83 мм (рис. 5, б).

При підйомі контейнера спредером максимальні напруження виникають в зонах взаємодії кутових стійок з торцевою стіною і склали 171,4 МПа (рис. 6, а)), отже не перевищують допустимі значення. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають в зонах взаємодії кутових стійок з боковими стінами – 1,91 мм (рис. 6, б)).

При штабелюванні контейнера максимальні напруження також виникають в зонах взаємодії кутових стійок з торцевою стіною (рис. 7, а)). Вони складають 164,3 МПа, що нижче за допустимі. Максимальні переміщення в конструкції контейнера склали 2,1 мм і мають місце в зонах взаємодії кутових стійок з боковими стінами (рис. 7, б)).

Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що міцність контейнера при розглянутих схемах його навантажень дотримується.

Висновки. 1. Проведено визначення міцності контейнера при підйомі за верхні фітинги. Розглядалися розрахункові схеми навантаження контейнера при його підйомі стропами, а також спредером. Встановлено, що при підйомі контейнера стропами максимальні напруження в його конструкції складають 158,3 МПа, а максимальні переміщення в вузлах конструкції – 1,83 мм.

При підйомі контейнера спредером максимальні напруження в його конструкції склали 171,4 МПа, а переміщення в вузлах конструкції – 1,91 мм. Отже міцність контейнера дотримується.

2. Проведено визначення міцності контейнера при штабелюванні. Встановлено, що максимальні напруження в його конструкції складають 164,3 МПа, а переміщення в вузлах – 2,1 мм. Отримані результати дозволяють стверджувати, що міцність контейнера при штабелюванні забезпечується.

Список літератури:

1. Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Pavliuchenkov M., Kravchenko O., Solcansky S. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13 (15). 8605. https://doi.org/10.3390/app13158605

2. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov. Study of the Dynamics and Strength of the Detachable Module for Long Cargoes under Asymmetric Loading Diagrams. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, 3211. https://doi.org/10.3390/app14083211

3. Ловська А. О. Визначення навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2019. Вип. 184. С. 6–19.

4. Ловська А. О. Дослідження міцності несучої конструкції контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні. *Транспортні системи і технології*. 2016. Вип. 28. С. 90–98.

5. Rahimov Rustam Vyacheslavovich, Khadjimukhametova Matluba Adilovna, akhmatov Zafar Xasanovich. Development of improved technical means fortransportation fruits and vegetables. *European science review*. 2016. Vol. 1–2. P. 175–177. https://doi.org/10.20534/ESR-16-1.2-175-177

6. Cheng K. J., Lees C. H., Peng C. C. Design and structural analysis of high payload C1 container. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2878. 012012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2878/1/012012

7. G. L. Vatulia, A. O. Lovska, Ye. S. Krasnokutskyi. Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2023. Vol. 1254. 012140. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012140

8. Alyona Lovska, Iraida Stanovska, Valeriia Kyryllova, Andrii Okorokov, Roman Vernigora. Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2024. № 6/7 (132). P. 6–14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311324

9. D. K. Antala, R. M. Satasiya, P. M. Chauhan. Design, development and performance evaluation of transportation container for sapota fruit. *Journal of Food Sciences and Technology.* 2021. Vol. 58 (10). P. 4024–4033. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04865-w

10. Gerlici J., Lovska A., Kravchenko O., Solcansky S., Krasnokutskyi Ye. The computer modelling of the vertical loading on a long-base flat wagon loaded with hopper containers. *Transportation Research Procedia.* 2023. Vol. 74 P. 387–394. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.159

11. ДСТУ ISO 1496-1:2013 Вантажні контейнери серії 1. Технічні вимоги та методи випробування. Частина 1. Контейнери загальної призначеності універсальні. Київ, 2013.

12. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс, 2018. 252 с.

13. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навчальний посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.

14. Gerlici J., Lovska A., Pavliuchenkov M., Harušinec J. Investigation of the Strength and Dynamic Load on a Wagon Covered with Tarpaulin for 1520 mm Gauge Lines. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. 6810. https://doi.org/10.3390/app14156810

15. Valeri Stoilov, Svetoslav Slavchev, Vladislav Maznichki and Sanel Purgic. Method for Theoretical Assessment of Safety against Derailment of New Freight Wagons. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. 12698. https://doi.org/10.3390/app132312698

16. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015.

Lovska A.O., Muradian A.O., Demydiakov O.V. DETERMINATION OF THE STRENGTH OF A HOPPER CONTAINER DURING LOADING AND UNLOADING OPERATIONS

The materials of the article highlight the design features of the hopper-type container, as well as determining its strength during loading and unloading operations. The container has sloping end walls, and its floor is formed by the covers of the unloading hatches. Such structural features of the container allow unloading of cargo from it by gravity. The container can also be unloaded using the "standing on its edge" scheme.

To ensure the strength of the container during loading and unloading operations, its calculation was carried out. The following loading schemes of the container were taken into account: lifting by the upper fitting (with slings or a spreader), as well as stacking. The strength calculation was implemented using the finite element method. It was implemented in SolidWorks Simulation. When compiling the calculation schemes of the container, provided that it is lifted by the upper fittings with slings, it was taken into account that the load from them is decomposed into two components – vertical and horizontal, which is determined by the angle of placement of the slings in space. When lifting the container with a spreader, a vertical load was applied to the upper fittings. In the case of stacking the container, a vertical load was applied to the upper and lower fittings. When performing the calculation, the effect of the vertical load on the container from its gross weight, as well as the pressure of the bulk cargo on the walls, was also taken into account. The finite element model of the container was formed by tetrahedra. The results of the calculations allowed us to conclude that the strength of the container under the given loading conditions is maintained.

The calculations made allow us to conclude that the strength of the container under the considered load schemes during loading and unloading operations is maintained.

Key words: *hopper-type container, loading and unloading operations, structural loading, structural strength, container transportation.*

УДК 629.463.62
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/46

Ловська А.О.
Український державний університет залізничного транспорту

Павлюченков М.В.
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Гарбуз А.О.
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Опанасенко О.В.
Український державний університет залізничного транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ДОВГОМІРНИХ ВАНТАЖІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

В статті висвітлено результати досліджень навантаженості модернізованої несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах. Особливість модернізації вагона-платформи полягає у постановці на повздовжні балки рами вертикальних стійок. Таке рішення дозволяє адаптувати його конструкцію до перевезень довгомірних вантажів. Дослідження проведено на прикладі вагона-платформи моделі 13–401. Визначення параметрів профілів виконання вертикальних стійок здійснено за моментом опору їх перерізу. Проведено визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи при найбільш несприятливих режимах експлуатаційних навантажень, зокрема, при перевезенні залізничним поромом.

Для визначення динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи проведено математичне. До уваги прийнято бортову хитавицю залізничного порому, оскільки даний вид коливань здійснює найбільший вплив на стійкість вагона-платформи відносно палуби. Розв'язок математичної моделі проведено із використанням програмного комплексу MathCad, який реалізує метод Рунге – Кутта. Результати розв'язку математичної моделі дозволили визначити прискорення, що діють на несучу конструкцію вагона-платформи та врахувати їх при розрахунках на міцність. Для цього сформовано просторову модель несучої конструкції вагона-платформи. До уваги прийнято елементи конструкції, які жорстко взаємодіють між собою. Графічні роботи зі створення просторової моделі відтворено у SolidWorks. Розрахунок на міцність проведено із використанням методу скінчених елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Встановлено, що напруження в несучій конструкції вагона-платформи не перевищують допустимих значень, отже його міцність забезпечується.

Результати проведених досліджень сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вагонів-платформ та створенню рекомендацій щодо їх експлуатації у залізнично-поромному сполученні.

Ключові слова: *залізничний транспорт, вагон-платформа, несуча конструкція вагона-платформи, модернізація вагона-платформи, міцність конструкції, залізнично-поромні перевезення.*

Постановка проблеми. Залізничний транспорт є провідною галуззю народного господарства від ефективності роботи якої залежить економічний розвиток багатьох європейських країн [1]. Наразі залізницею перевозиться досить широка номенклатура вантажів [2]. Одним із таких вантажів є довгомірні: ліс у хлистах, будівельні матеріали, труби тощо. Перевезення довгомірних вантажів залізницею здійснюється на спеціалізованих вагонах-платформах, які обладнані вертикальними стійками для утримання вантажів від перекидання. Разом із цим чисельність таких вагонів є обмеженою та не забезпечує повною мірою попиту на перевезення довгомірних вантажів. Це обумовило використання інших типів вагонів під такі перевезення: універсальні вагони-платформи чи напіввагони.

Для можливості перевезень довгомірних вантажів на універсальних вагонах-платформах на їх повздовжніх балках встановлюються дерев'яні стійки. Ці стійки кріпляться в лісових скобах, які приварені до вертикальних частин двотаврів, що

утворюють повздовжні балки рами. Треба сказати, що в умовах експлуатації дерев'яні стійки можуть мати пошкодження. Це сприяє розвалюванню вантажу та може призвести до порушення безпеки його перевезень. При перевезенні вагонів-платформ на залізничних поромах внаслідок впливу на несучу конструкцію підвищених динамічних навантажень зростає загроза виникнення подібних ситуацій. Така обставина зумовлює необхідність модернізації вагонів-платформ з метою безпечного перевезення довгомірних вантажів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням створення, удосконалень та підвищення ефективності експлуатації вагонів-платформ присвячено чимало наукових робіт. Наприклад, в статті [3] для адаптації вагона-платформи до перевезень довгомірних вантажів пропонується застосування знімного модуля. Особливістю модуля є наявність пружно-фрикційних зв'язків в конструкції, що сприяє зменшенню його динамічної навантаженості в експлуатації. Однак використання знімного модуля потребує відповідної системи технічного обслуговування та ремонту, що стримує серійність його впровадження в експлуатацію. Крім того, в роботі не приділялося уваги можливості перевезень такого модуля на залізничних поромах.

Авторами роботи [4] проведено аналіз впливу динамічних навантажень на міцність несучої конструкції вагона-платформи, призначеної для перевезень довгомірних вантажів. Висвітлено особливості проведеного модального аналізу конструкції вагона-платформи. Але в роботі не наведено рішень, спрямованих на покращення ефективності перевезень довгомірних вантажів на вагонах-платформах та їх адаптацію до залізнично-поромних перевезень.

Конструкцію довгобазного вагона-платформи зі змінною довжиною вантажного простору запропоновано авторами роботи [5]. В роботі наведено обґрунтування прийнятих при проєктуванні вагона-платформи рішень шляхом статичного та динамічного аналізу конструкції. Але авторами не досліджувались питання можливості залучення даної конструкції вагона-платформи до перевезень довгомірних вантажів, в тому числі, в міжнародному залізнично-поромному сполученні.

Подібний недолік має і дослідження, висвітлено в рамках публікації [6]. Авторами приділено увагу визначенню навантаженості вагона-платформи при експлуатаційних режимах, але не розглянуто можливості його адаптування до перевезень довгомірних вантажів та залізнично-поромним перевезенням.

В статті [7] висвітлено особливості визначення навантаженості довгобазної конструкції вагона-платформи. Покращення міцності її конструкції запропоновано впровадженням нових матеріалів виконання. Разом із цим, поза увагою авторів залишилися питання залучення даної конструкції вагона-платформи до перевезень довгомірних вантажів.

Дослідженню міцності довгобазної конструкції вагона-платформи присвячено публікацію [8]. Для визначення найбільш навантажених зон конструкції вагона-платформи авторами розраховано згинальні моменти, які діють в її перерізах. Але авторами не проводилося визначення навантаженості вагона-платформи за умови перевезень довгомірних вантажів, а також при перевезенні на залізничних поромах.

Проведений огляд наукових публікацій доводить, що питання визначення навантаженості та покращення безпеки руху вагонів-платформ є актуальними. Разом із цим, для підвищення ефективності перевезень довгомірних вантажів залізницею, а також в міжнародному залізнично-поромному сполученні, дослідження, присвячені адаптації (модернізації) вагонів-платформ до таких перевезень, потребують подальшого розвитку.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення доцільності модернізації універсального вагона-платформи для перевезень довгомірних вантажів, в тому числі, на залізничних поромах. Досягнення поставленої мети відбувалося шляхом розв'язку таких завдань дослідження:

– визначити силові фактори в модернізованій несучій конструкції вагона-платформи;

– провести розрахунок на міцність модернізованої несучої конструкції вагона-платформи при залізнично-поромних перевезеннях.

Виклад основного матеріалу. Для можливості перевезень довгомірних вантажів на універсальному вагоні-платформі пропонується модернізація його конструкції, яка полягає у використанні вертикальних стійок для утримання вантажу від перекидання (рис. 1). Верхні частини вертикальних стійок сполучені ув'язувальними пристроями (ланцюгами або тросами). Дана модернізація передбачає виготовлення вертикальних стійок із сталі марки 09Г2С. Тобто матеріал виконання вертикальних стійок

ідентичний до матеріалу виконання несучої конструкції вагона-платформи.

Для визначення параметрів профілів виконання вертикальних стійок проведено відповідний розрахунок. Метою даного розрахунку було визначення внутрішніх силових факторів, що діють в вертикальних стійках, при сприйнятті зовнішніх навантажень.

Розрахунок несучої конструкції вагона-платформи проведено як стрижневої системи (рис. 2). При цьому застосовано програний комплекс «Ліра – САПР» [9].

Враховано, що конструкція навантажена вагою брутто, а на вертикальні стійки діє бокове навантаження. Інтенсивність цього навантаження враховує поперечну інерційну силу ΔF_n, яка діє від штабеля та розподілене за висотою вертикальної стійки L_{cm} [3]:

$$P_c = \frac{\Delta F_n}{L_{cm}}, \qquad (1)$$

при цьому

$$\Delta F_n = n \cdot (F_n + W') - F_{mp}^n, \qquad (2)$$

де n – коефіцієнт, який закладається при проєктуванні вагона-платформи; $F_{\text{п}}$ – поперечне інерційне навантаження, яке враховує силу від штабеля та відцентрову силу; W' – вітрове навантаження; F_{mp}^n – сила тертя.

З одного боку вагона це навантаження приймалося зі знаком «+», а з іншого зі знаком «–». Закріплення вагона відбувалося за п'ятники. З урахуванням проведених розрахунків встановлено, що епюра згинальних моментів має вигляд параболи з максимумом в середній частині (рис. 3). З боку навантаження стійок значення згинального моменту складає 55,3 кН · м, з протилежного боку чисельне значення згинального моменту є від'ємним.

Для визначення товщини стінок вертикальних стійок враховано геометрію скоби лісової стійки. Отже нижня частина стійка повинна мати ширину b = 80 мм та довжину l = 110 мм. Підбір оптимальної товщини робочої частини вертикальної стійки (зона стійки, яка контактує з вантажем) здійснено за моментом опору її поперечного перерізу. Він визначався за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks. При цьому момент

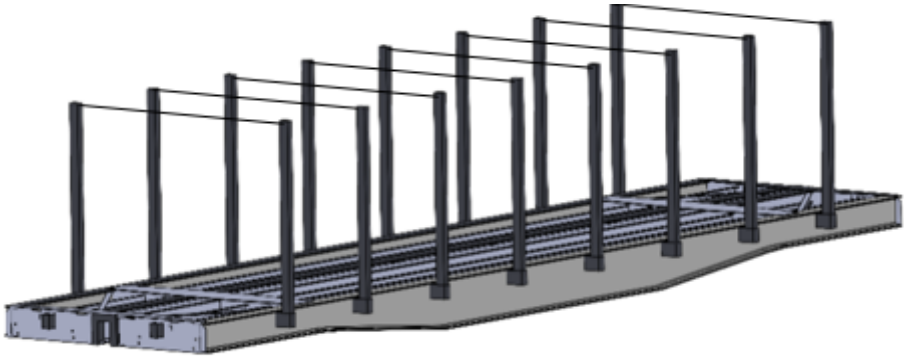


Рис. 1. Несуча конструкція вагона-платформи з урахуванням заходів щодо модернізації

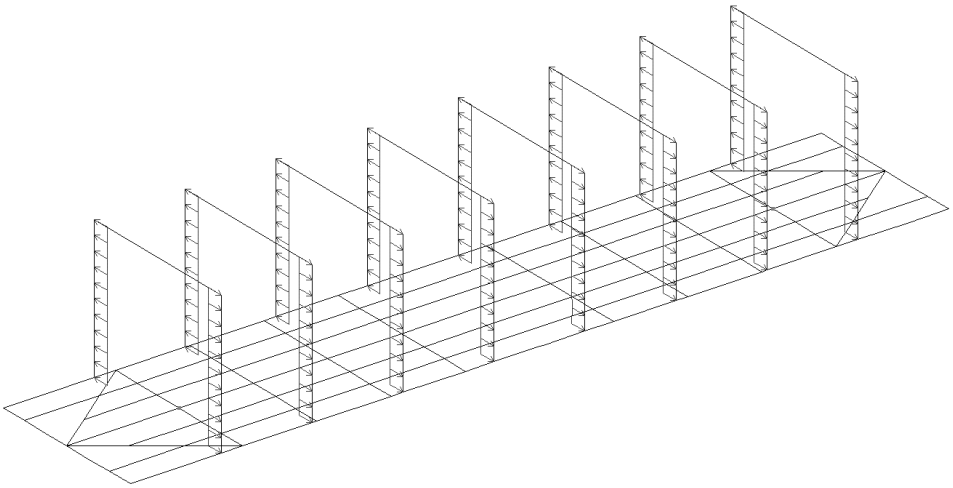


Рис. 2. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

опору при якому буде дотримуватись міцність вертикальної стійки визначено як відношення згинального моменту M, що діє в її перетині до допустимих напружень $[\sigma]$ матеріалу виконання, тобто $W = M / [\sigma]$. Допустимі напруження $[\sigma]$ для сталі марки 09Г2С прийнято рівними 310,5 МПа у відповідності до [10]. Тоді, $W = 178$ см^3. В програмному комплексі SolidWorks створено відповідну геометрію вертикальної стійки та відбувалось варіювання товщиною її стінки. На підставі проведених розрахунків встановлено, що при ширині робочої частини вертикальної стійки 110 мм та висоті – 140 мм, товщина її стінки повинна складати 10 мм. При цьому $W = 178$ см^3. Маса однієї стійки складає 99 кг. Отримані результати підтверджено розрахунками на міцність несучої конструкції вагона-платформи при основних експлуатаційних режимах навантажень.

Для можливості залучення модернізованої конструкції вагона-платформи до перевезень залізничними поромами пропонується встановлення на основних повздовжніх балках надбудов для розміщення ланцюгових стяжок (рис. 4).

Для визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи при перевезенні на залізничному поромі проведено його розрахунок. При цьому використано метод скінчених елементів [11], який реалізовано у SolidWorks Simulation. Розрахункову схему несучої конструкції вагона-платформи наведено на рис. 5.

При складанні розрахункової схеми враховано, що на несучу конструкцію

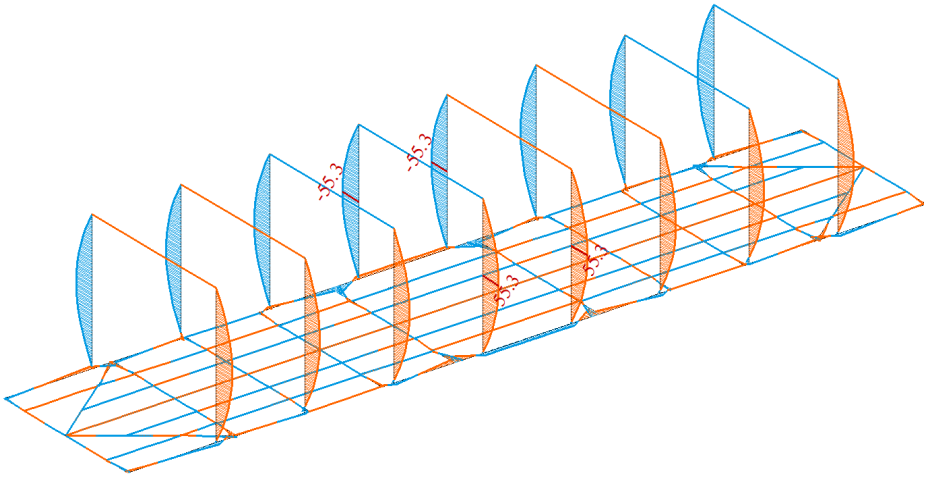


Рис. 3. Епюра згинальних моментів, що діють на несучу конструкцію вагона-платформи (кН · м)

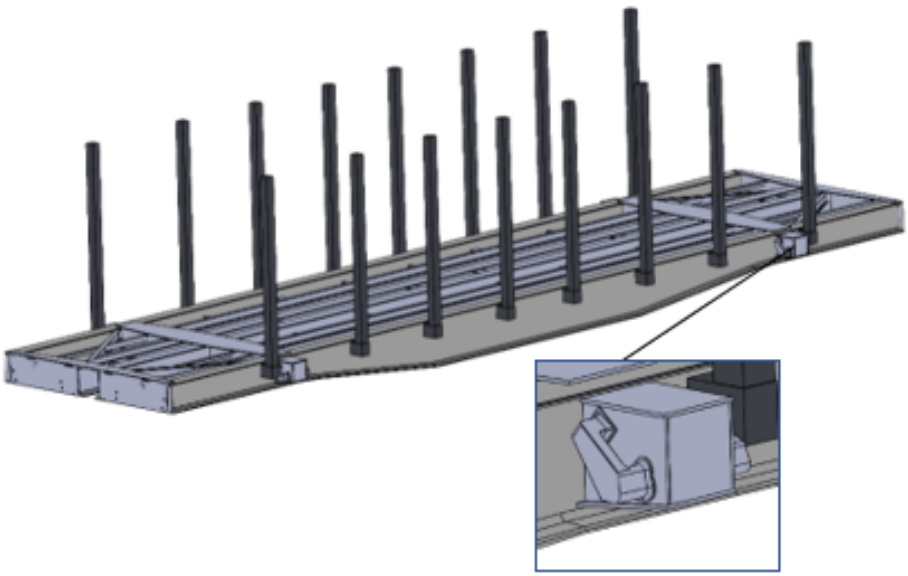


Рис. 4. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи з вузлами для закріплення ланцюгових стяжок

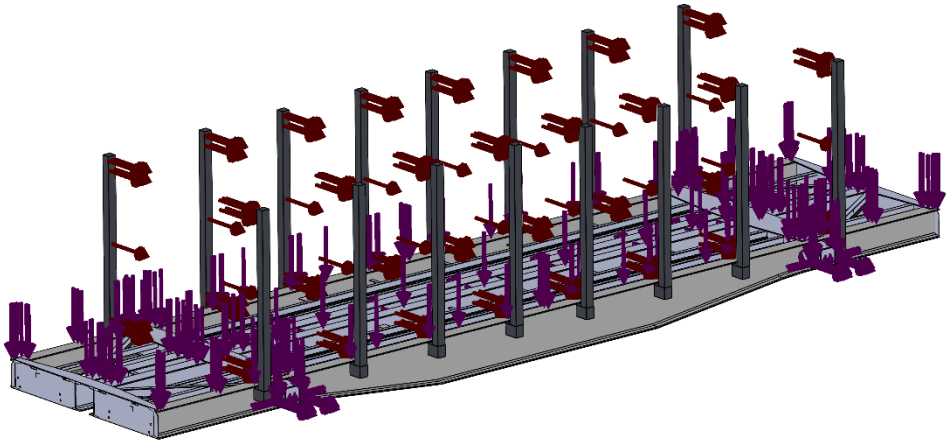


Рис. 5. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

вагона-платформи діє вертикальне навантаження, зумовлене власною вагою та вагою перевозимого вантажу (із використанням повної вантажопідйомності), бокові навантаження на вертикальні стійки, а також навантаження від ланцюгових стяжок, прикладені до вузлів закріплення. При цьому навантаження від ланцюгових стяжок розкладалися на три складові, із урахуванням кутів їх розміщення в просторі. Ці кути прийнято рівними нормативним значенням. Дане навантаження з боку нахилу вагона-платформи враховувалося із складовою від динамічного навантаження, а з протилежного боку – враховувалося навантаження від натяжіння ланцюгової стяжки (50 кН).

Для визначення бокових навантажень, а також навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи від ланцюгових стяжок проведено математичне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи при перевезенні залізничним поромом. До уваги прийнято бортову хитавицю залізничного порому, оскільки даний вид коливань здійснює найбільший вплив на стійкість вагона відносно палуби. Математична модель навантаженості вагона-платформи має вигляд [12]:

$$\left(\frac{D}{12\cdot g}(B^2+4z_g{}^2)\right)\ddot{q}_1+\left(\Lambda_\theta\cdot\frac{B}{2}\right)\dot{q}_1= \\ =p'\cdot\frac{h}{2}+\Lambda_\theta\cdot\frac{B}{2}\cdot\dot{F}(t), \tag{3}$$

де $q=\theta$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню залізничного порому з вагонами навколо повздовжньої осі. Початок системи координат розміщений в центрі мас залізничного порому.

D – вагове водовитіснення; B – ширина борта; h – висота борта; Λ_θ – коефіцієнт опору коливанням; z_g – координата центру ваги; p' – вітрове навантаження; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збурює рух залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах.

Розрахунок проведено на прикладі залізничного порому «Герои Шипки», який рухається акваторією Чорного моря. Розв'язок математичної моделі здійснено у програмному комплексі MathCad за методом Рунге – Кутта. Початкові умови покладені рівними нулю. Проведені розрахунки встановили, що прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи складає близько 0,2 g. Визначена величина прискорення врахована при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-платформи.

При створенні скінчено-елементної моделі використано тетраедри. Їх чисельність склала 147362 одиниці, а вузлів – 48860. Закріплення моделі здійснювалося за п'ятники, а також за зони взаємодії несучої конструкції вагона-платформи з упор домкратами (опорні поверхні шворневих балок). На верхніх частинах вертикальних стійок встановлювався зв›язок, який імітує їх взаємодію з ув'язувальними пристроями. Результати розрахунку наведено на рис. 6, 7.

Найбільші напруження в несучій конструкції вагона-платформи виникають в надбудовах для розміщення вузлів для закріплення ланцюгових стяжок – 288,1 МПа (рис. 6). Разом із цим, зі напруження нижчі за допустимі на 7,2%. При цьому допустимі напруження прийнято рівними 310,5 МПа [10].

Максимальні переміщення виникають у верхніх частинах вертикальних стійок, розміщених за центром повздовжньої балки. Ці переміщення склали 5,8 мм (рис. 7).

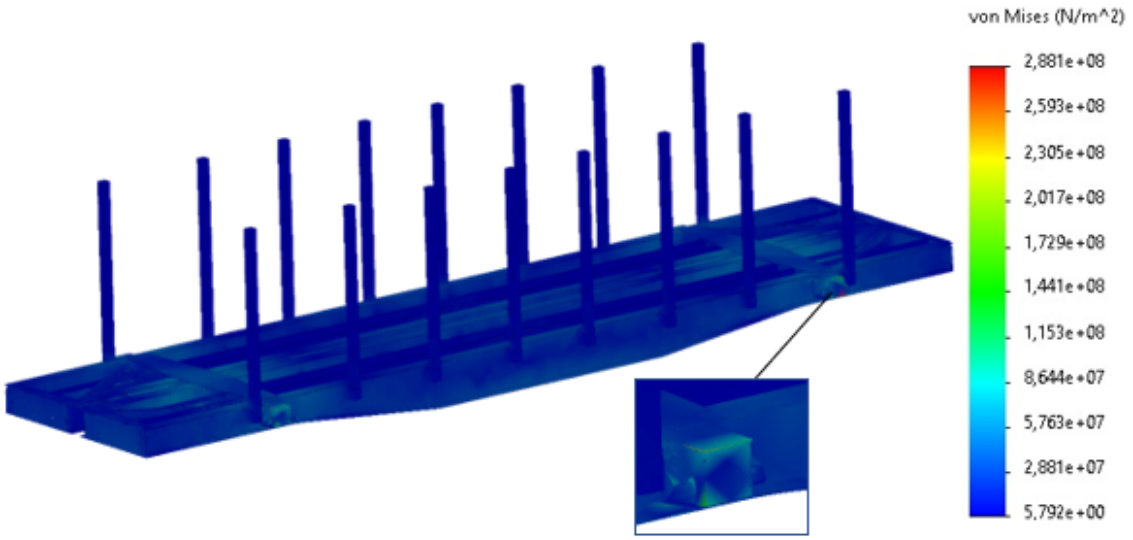


Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

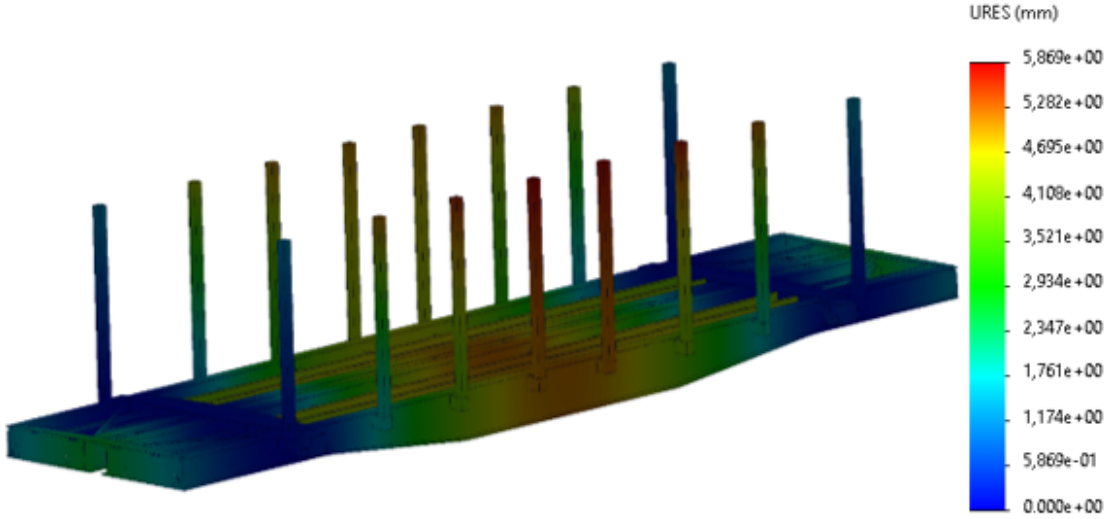


Рис. 7. Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи

Проведені розрахунки доводять доцільність запропонованих рішень щодо модернізації несучої конструкції вагона-платформи.

Висновки. 1. Визначено силові фактори в модернізованій несучій конструкції вагона-платформи. Встановлено, що з боку навантаження вертикальних стійок значення згинального моменту складає 55,3 кН · м, з протилежного боку чисельне значення згинального моменту є від'ємним. З урахуванням визначеного згинального моменту за моментом опору поперечного перерізу підібрано параметри профілю виконання вертикальної стійки: ширина робочої частини стійки – 110 мм, висота – 140 мм, товщина стінки – 10 мм. Маса однієї стійки складає 99 кг. З урахуванням подальшої оптимізації, яку планується робити на послідуючих етапах досліджень, прогнозується зменшення маси вертикальної стійки у порівнянні із першепочатковим. Проведено розрахунок на міцність модернізованої несучої конструкції вагона-платформи. Встановлено, що міцність її конструкції дотримується.

2. Проведено розрахунок на міцність модернізованої несучої конструкції вагона-платформи при перевезенні залізничним поромом. Встановлено, що максимальні напруження в несучій конструкції вагона-платформи складають 288,1 МПа та не перевищують допустимі. Ці напруження виникають в надбудовах для розміщення вузлів для закріплення ланцюгових стяжок. Максимальні переміщення виникають у верхніх частинах вертикальних стійок, розміщених за центром повздовжньої балки і дорівнюють 5,8 мм.

Список літератури:

1. Gerlici J., Lovska A., Kozáková K. Research into the Longitudinal Loading of an Improved Load-Bearing Structure of a Flat Car for Container Transportation. *Designs.* 2025. Vol. 9 (1) 12. https://doi.org/10.3390/designs9010012
2. Aliyu Kasimu, Wei Zhou, Hongkai Yan, Yazhao Wang, Chao Shen, Qiang Zhang. Evaluation of the vehicle-cargo and vehicle-trackside clearance of long and big railway freight vehicles. *Alexandria Engineering Journal.* 2025. Vol. 119. P. 22–34. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.113
3. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Volodymyr Nerubatskyi, Andrii Okorokov, Denys Hordiienko, Roman Vernigora, Irina Zhuravel. Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. № 6/7 (120). P. 21–29. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855
4. Rúben Silva, Diogo Ribeiro, Cássio Bragança, Cristina Costa, António Arêde, Rui Calçada. Model Updating of a FreightWagon Based on Dynamic Tests under Different Loading Scenarios. *Applied Science.* 2021. Vol. 11. 10691. https://doi.org/10.3390/app112210691
5. Pavol Šťastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences.* 2018. Vol. 235 (2). 00030. https://doi.org/10.1051/matecconf/201823500030
6. Apurba Das, Gopal Agarwal. Compression, tension & lifting stability on a meter gauge flat Wagon: an experimental approach. *Australian Journal of Mechanical Engineering.* 2020. June. https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1775007
7. Fedosov-Nikonov D. V., Sulym A. O., Ilchyshyn V. V., Safronov O. M., Kelrikh M. B. Study of strength characteristics of the long wheelbase flatcars. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 985. 0120229. https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029
8. Ishchenko V. M., Fedosov-Nikonov D. V. Long Wheelbase Flat Wagons: Structural Strength. *Metallurgical and Mining Industry.* 2017. No. 8. P. 26–31.
9. Барабаш М. С., Сорока М. М., Сур'янінов М. Г. Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра – САПР. Одеса: Екологія. 2018. 248 с.
10. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015.
11. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov. Study of the Dynamics and Strength of the Detachable Module for Long Cargoes under Asymmetric Loading Diagrams. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, 3211. https://doi.org/10.3390/app14083211
12. Lovska A., Gerlici J., Dizo J., Ishchuk V. The strength of rail vehicles transported by a ferry considering the influence of sea waves on its hull. *Sensors.* 2024. Vol. 24 (1), 183. https://doi.org/10.3390/s24010183

Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Garbuz A.O., Opanasenko O.V. RESEARCH OF THE LOADING OF A FLAT WAGON FOR LONG CARGO IN OPERATIONAL MODES

The article highlights the results of studies of the loading of the modernized supporting structure of the flat wagon under operational modes. The peculiarity of the modernization of the flat wagon is the placement of vertical racks on the longitudinal beams of the frame. This solution allows adapting its design to the transportation of long cargo. The study was conducted on the example of the flat wagon model 13-401. The parameters of the profiles of the vertical racks were determined based on the moment of resistance of their section. The strength of the supporting structure of the flat wagon was determined under the most unfavorable operating load modes, in particular, when transporting by rail ferry.

To determine the dynamic loads acting on the supporting structure of the flat wagon, mathematical modeling was performed. The onboard sway of the railway ferry was taken into account, since this type of oscillation has the greatest impact on the stability of the flat wagon relative to the deck. The solution of the mathematical model was performed using the MathCad software package, which implements the Runge-Kutta method. The results of the mathematical model solution allowed us to determine the accelerations acting on the supporting structure of the flat wagon and to take them into account in strength calculations. For this purpose, a spatial model of the supporting structure of the flat wagon was formed. Structural elements that rigidly interact with each other were taken into account. Graphical work on creating a spatial model was reproduced in SolidWorks. Strength calculations were performed using the finite element method in the SolidWorks Simulation software package. It was established that the stresses in the supporting structure of the flat wagon do not exceed the permissible values, therefore its strength is ensured.

The results of the conducted research will contribute to increasing the efficiency of the operation of the flat wagon and creating recommendations for their operation in rail-ferry traffic.

Key words: *rail transport, flat wagon, supporting structure of the flat wagon, modernization of the flat wagon, structural strength, rail-ferry transportation.*

УДК 656.614.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/47

Малахов О.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

Ніколаєва Л.Л.
Національний університет «Одеська морська академія»

Кіріс О.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

Бондаренко А.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

Козирєв І.П.
Національний університет «Одеська морська академія»

Палагін О.М.
Дунайський інститут Національного університету
«Одеська морська академія»

Найдьонов А.І.
Дунайський інститут Національного університету
«Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ НА СУДНАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СЕПЕРАЦІЇ СУДНОВИХ ЛЛЯЛЬНИХ ВОД

Проблема сепарації суднових лляльних вод – суміші води з продуктами нафтохімії, що утворюється під час експлуатації суден водного транспорту є актуальною і потребує нових методів для свого вирішення. Для цього виконано аналіз основних особливостей кавітаційного методу сепарації, що ґрунтується на використанні принципу холодного кипіння потоку за рахунок низької величини його тиску в локально виділеній області робочої камери сепаратора. Показано, що кавітація може створюватися шляхом використання ультразвукових коливань і штучного вдування повітря, в потік, що рухається. На початковій стадії використання ультразвукового джерела хвиль зниженого тиску призведе до отримання першої стадії бульбашкової кавітації, а подальша вентиляція каверни дозволить вивести її на режим суперкавітації – суцільної парової каверни. В результаті досліджень показано, що при штучній вентиляції каверни при обробці суднових лляльних вод при переході на менші швидкості входу потоку води до сепаратора величина тиску пароутворення підвищується. Встановлено, що епюра тиску в перетині відбору водяної пари не повинна містити різких зламів свого контуру. У ході досліджень було виконано оцінку ступеня ефективності процесу сепарації суднових лляльних вод. Ефективність визначалася при трьох способах підтримки кавітації: гідродинамічному, ультразвуковому, ультразвуковому у комбінації зі штучною вентиляцією каверни за допомогою повітря. Спільний аналіз отриманих результатів дозволив виділити чисельні діапазони оптимальної робочої області експлуатації сепараційної установки. В цій зоні енергетичний ККД набуває своїх максимальних значень, об'ємний ККД практично не змінюється, а гідравлічний ККД змінюється в незначних межах. Отримані висновки про способи підвищення якості роботи суднового сепаратора лляльних вод.

Ключові слова: *суднові лляльні води, сепарація, ультразвукова кавітація, водяна пара, діапазон експлуатації.*

Постановка проблеми. Під час експлуатації суден водного транспорту нині виробилася чітка тенденція підвищення потужності суднових енергетичних установок з одночасним зниженням енергетичних ресурсів, що витрачаються під час роботи судна. Використовуються різні схеми регенерації тепла, застосовуються нові конструкції суднових дизелів та

використовуються нетрадиційні джерела енергетичних ресурсів, до одного з яких можна віднести суднові лляльні води – суміш води з концентрованими продуктами нафтохімії.

Основна проблема всіх відомих технологій сепарації суднових лляльних вод полягає у відсутності можливості збору та подальшої переробки висококонцентрованої суміші нафтопродуктів, що одержується на виході. Кінцевим продуктом є лише очищена вода. Вирішення цієї проблеми може кардинально вплинути на скорочення обсягів використовуваних природних ресурсів і підвищити якість контролю за станом екології та біосфери в планетарному масштабі.

На актуальність вирішення проблеми сепарації суднових лляльних вод вказує низка міжнародних угод, програм та нормативних документів. До основного переліку таких документів належать: Конвенція з охорони та використання транскордонних водотоків та міжнародних озер, Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі, MARPOL 73/78 [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз основних особливостей кавітаційного методу сепарації судових лллних вод показує, що він був розроблений відносно недавно і ґрунтується на використанні принципу холодного кипіння потоку за рахунок низької величини його тиску в локально виділеній області простору робочої камери установки сепарації.

Кавітаційний метод сепарації використовується для чисел кавітації, що не перевищують величину Ω=0.3, а саме число кавітації визначається як

$$\Omega = \frac{P_\infty - P_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{V^2 - V_\infty^2}{V_\infty^2} \qquad (1)$$

де V – швидкість потоку на межі кавітаційної каверни, *м/с*, V_∞ – швидкість потоку на нескінченності, *м/с*.

Принцип роботи кавітаційного сепаратора суднових лляльних вод базується на фазовому переході водної складової під впливом на оброблюваний багатофазний потік кавітаційного поля в межах значень температури від 20 до 80 °С. Процес такого фазового переходу є регульованим, а сама кавітація може створюватися шляхом штучного вдування потоку газу, найчастіше повітря, в потік, що рухається. Такий процес характеризується підвищеними значеннями чисел кавітації (0,18 < Ω < 0,34).

Кавітаційна каверна може створюватися не тільки за рахунок високої швидкості потоку, що обробляється, але і штучним шляхом – за рахунок вдування повітря або з використанням ультразвукових коливань. Виходячи із цих двох механізмів створення каверни, як видно на рисунку 1 при використанні режиму очищення суднових лляльних вод із застосуванням штучної кавітації стінка вхідної розподільної пластини 1 може являти собою одночасно канал для подачі повітря на вентиляцію каверни або виступати в ролі складового елемента для ультразвукових генератора коливань 4.

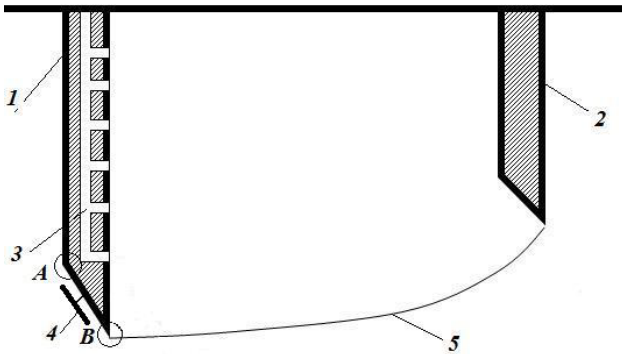


Рис. 1. Схема камери сепаратора
1, 2 – вхідна та вихідна пластини;
3 – канал для подачі повітря на вентиляцію каверни; 4 – генератор ультразвукових коливань;
5 – межа каверни

При створенні кавітації особливе значення має ступінь загостреності кромки вхідної пластини, яка впливає на градієнт зміни швидкості. Зрив потоку з гострої грані забезпечуватиме негативний профіль епюри швидкості, який згідно з матеріалами роботи [2] призводитиме до виникнення дрібномасштабних вихрових утворень. Такі дрібнодисперсні вихори можуть бути джерелами зародження ядер кавітації, а самі ядра кавітації будуть чітко локалізовані необхідної для процесу сепарації області робочого каналу.

Процес випаровування не є односпрямованим. При випаровуванні через межу кавітаційної каверни деякий об'єм частинок водяної пари буде повертатися назад у оброблюваний потік. Згідно з результатами роботи [2] кількість частинок, що повертаються при конденсації, знаходиться в прямій залежності від числа зіткнень молекул водяної пари в зоні випаровування і відповідно, від маси випареної речовини.

Постановка завдання. Всі існуючі технології сепарації суднових лляльних вод призначені для очищення води від домішок і не дозволяють виконувати збір концентрованих

залишків нафтопродуктів на виході з сепаратора [3, 4] Єдиною альтернативою може виступати метод кавітаційної сепарації [2].

Через новизну методу багато питань його практичної реалізації залишаються, як і раніше, не дослідженими. В основному всі невирішені питання пов'язані зі створенням та підтримкою на стійкому рівні меж кавітаційної каверни при найменших витратах енергії, як на створення ультразвукового поля, так і на підтримку високих значень швидкості руху потоку, що обробляється. Додаткову складність додає відбір водяної насиченої пари, що сепарується, з каверни в силу чого її динамічна поведінка завжди характеризується нестаціонарним характером.

Як найбільш раціональне рішення в ході попередніх досліджень було розглянуто комбінований спосіб створення та керування межами кавітаційної каверни. На початковій стадії використання ультразвукового джерела хвиль зниженого тиску призведе до отримання першої стадії бульбашкової кавітації, а подальша вентиляція каверни дозволить вивести її на режим суперкавітації – суцільної парової каверни.

Головним завданнями досліджень в цьому випадку є оцінка ступеня ефективності процесу сепарації суднових лляльних вод для ультразвукової вентиляції і знаходження діапазону змін приватних ККД, що характеризують процес сепарації.

Виклад основного матеріалу. Відрив від генератора ультразвукових коливань потоку суднових лляльних вод з руйнуванням кавітаційної каверни незмінно призводитиме до пульсуючого характеру процесу сепарації. Усунення таких пульсацій можна досягти шляхом зменшення швидкості руху суднових льяльних вод або за рахунок штучної вентиляції каверни. У цьому випадку величина числа кавітації може бути зміщена в область вищих значень. Перевага штучної вентиляції каверни при обробці суднових лляльних вод наочно демонструється отриманим експериментальним шляхом графіком, представленим на рисунку 2. На ньому видно, що при переході на менші швидкості (зі зростанням числа кавітації) входу потоку води до сепаратора величина тиску пароутворення підвищується. Наведені експериментальні результати отримані для потоку води, що рухається в циліндричному трубопроводі при температурі нагріву 60 °С.

У ході сепарації суднових лляльних вод величина тиску всередині кавітаційної каверни завжди буде на порядок нижче величини зовнішнього тиску потоку на вході в робочу камеру сепараційної установки. З цієї причини величина мінімального коефіцієнта тиску C_p у вхідному перерізі робочої лінії з відбору водяної пари завжди буде негативною величиною. З цієї причини тиск у каверні перевищить тиск у лінії

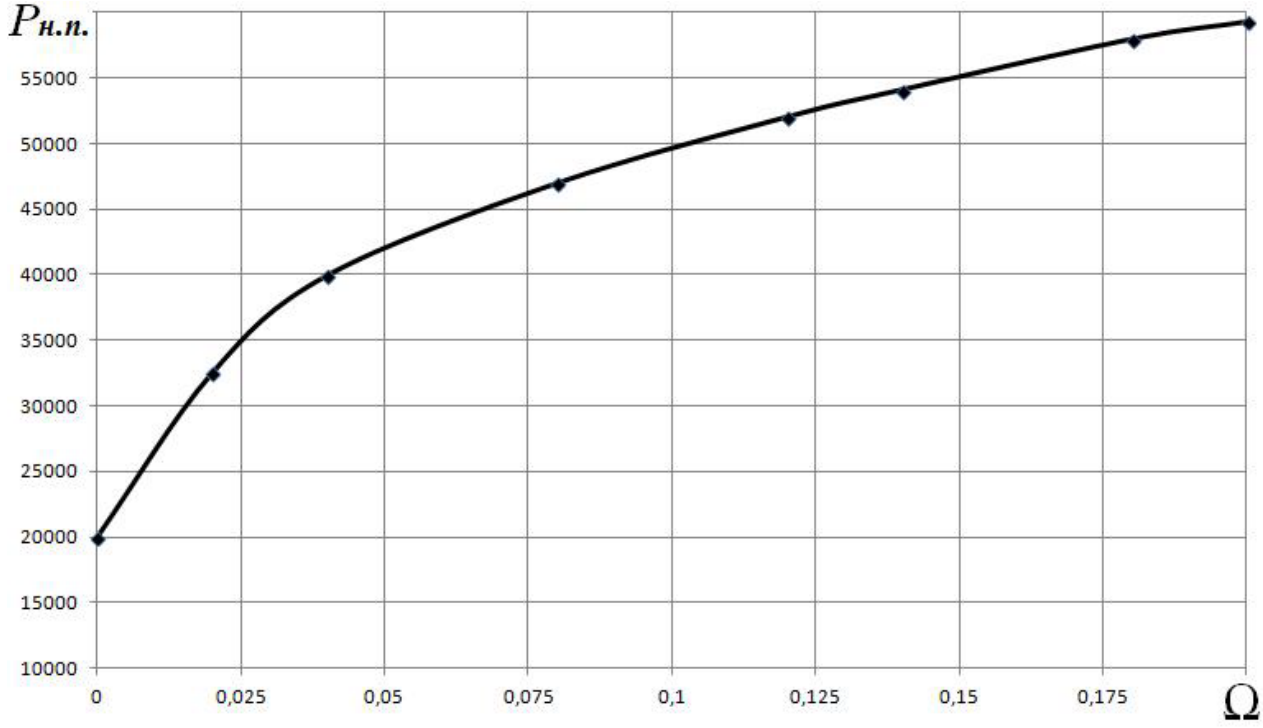


Рис. 2. Залежність тиску пароутворення від числа кавітації

відбору водяної пари тільки в тому випадку, коли виконуватиметься нерівність виду

$$\left|C_p\right| > \Omega \qquad (2)$$

Аналіз виразу (2) дозволяє зробити висновок про те, що епюра тиску в перетині відбору водяної пари не повинна містити різких зламів свого контуру. Тобто при відборі водяної пари незалежно від режиму роботи сепаратора необхідно забезпечувати гладкі і рівномірно розподілені епюри швидкості потоку, що відбирається. Технічно цю вимогу можна реалізувати шляхом використання різних соплових насадок у вхідних ділянках ліній відбору водяної пари.

Важливим питанням є обмеження на процес розгерметизації каналу для відведення водяної пари, що у процесі сепарації з суперкавітаційної каверни безупинно відбирається. При відборі з робочої камери сепаратора велике значення має швидкість відведення. Її максимальне значення відповідає критичній швидкості, яка для реальних умов експлуатації суднового сепаратора лляльних вод визначається як

$$V_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2k_{\text{п}}}{k+1}\text{g}\frac{P_{max}}{\rho_{max}}} \qquad (3)$$

$k_{\text{п}}$ – показник адіабати водяної пари.

Значення, одержані по (3) в умовах експлуатації будуть меншими на величину швидкісного коефіцієнта φ, що відображає умови входу пари в трубопровід

$$V_{\text{отв}} = \varphi V_{кр} \qquad (4)$$

При відборі водяної пари з кавітаційної каверни через трубки, що розташовані на верхній поверхні робочої камери кавітатора виникає висока ймовірність прориву суміші повітря з водяною парою у зворотному напрямку від компресора усередину кавітаційної порожнини. Це може мати місце при некоректній роботі автоматично керованих клапанів. У цьому випадку буде повне руйнування кавітаційної каверни і зупинка процесу сепарації.

Умову зворотного прориву повітря можна висловити за аналогією з теоретичними дослідженнями роботи [2] через різницю тисків у лінії відбору водяної пари та кавітаційної суперкаверні.

Тиск усередині каверни, що кавітує можна записати як

$$P_{\text{к}} = P_0 - \Omega\frac{\rho V_0^2}{2} \qquad (5)$$

P_0 – статичний тиск усередині каверни; V_0 – швидкість потоку на вході до робочої лінії для відбору пари.

Мінімальний тиск усередині робочої лінії відбору водяної пари має вигляд

$$P_{min} = P_0 + \text{C}_p\frac{\rho V_0^2}{2} \qquad (6)$$

C_{p} – мінімальний коефіцієнт тиску у вхідному перерізі робочої лінії з відбору пари.

В остаточному вигляді відносна різниця тисків була записана у вигляді

$$\frac{P_к - P_{min}}{\frac{\rho V_0^2}{2}} = \grave{\text{U}} + \text{C}_p \qquad (7)$$

Під час досліджень було знайдено залежність величини коефіцієнта опору C_x вхідної розподільної пластини в залежності від числа кавітації. Як показано на рисунку 3 це було виконано для двох обтічних конструкцій. Перший варіант відповідав окремо взятій пластині. Друга конструкція передбачала встановлення на вхідній розділовій пластині генератора ультразвукових коливань.

Характер зміни двох графіків є практично ідентичним – зростання числа кавітації призводило до збільшення коефіцієнта опору вхідної розподільної пластини. Відмінність у числових значеннях обумовленахарактером руху потоку поблизу гострого краю пластини. Наявність генератора ультразвукових коливань призводила до підвищених значень локального поля тиску цієї частини робочої камери. Це відображалося в зростанні гідродинамічного опору насадка, що обтикається потоком.

У ході проведення досліджень було виконано оцінку ступеня ефективності процесу сепарації суднових лляльних вод. Отримані дані відповідають однаковим часовим інтервалам при повністю ідентичних параметрах потоку, що обробляється на вході в робочу камеру кавітаційного каналу. Ефективність сепарації була оцінена за масовою витратою води, що була одержана після відділення і вона визначалася при трьох способах підтримки кавітації: гідродинамічному; ультразвуковому; ультразвуковому у комбінації зі штучною вентиляцією каверни за допомогою повітря.

На рисунку 4 показана зміна об'ємного, гідравлічного та енергетичного ККД для випадку штучної вентиляції каверни з використанням ультразвуку. Спільний аналіз наведених графіків дозволяє виділити оптимальну

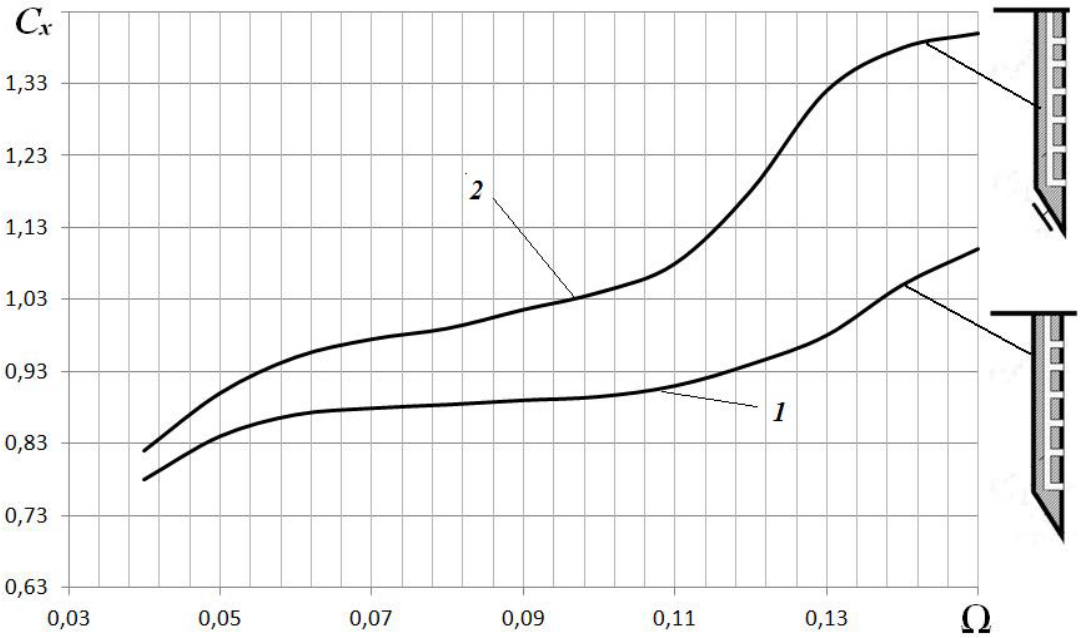


Рис. 3. Залежність коефіцієнта опору C_x вхідної розподільної пластини від числа кавітації потоку
1 – пластина без генератора ультразвукової кавітації; 2 – пластина з генератором ультразвукової кавітації

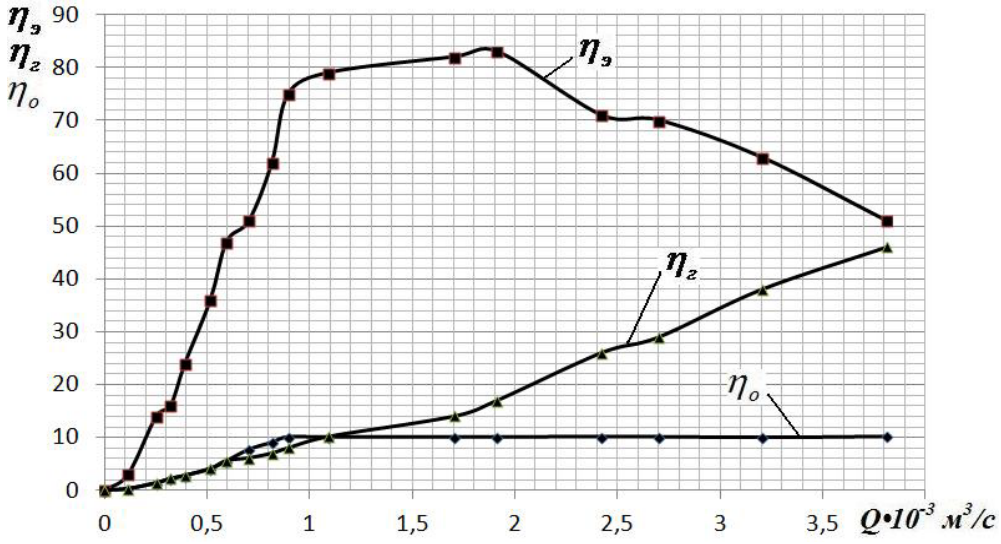


Рис. 4. Зведений графік приватних ККД сепараційної установки

робочу область експлуатації суднової сепараційної установки. Діапазон її меж за величиною об'ємної витрати наступний: початок робочої зони: $Q = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ м^3/с; закінчення робочої зони: $Q = 2{,}2 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

Саме в цій зоні енергетичний ККД набуває своїх максимальних значень (η_e = 62–83%), об'ємний практично не змінюється (η_o = 9,15–0,2%), а гідравлічний ККД змінюється в незначних межах ($\eta_г$ = 7–22%).

На підставі графіка можна зробити висновок про недоцільність зміни розмірів кавітаційного каналу у велику сторону. Збільшення величини об'ємної витрати призводитиме лише до зміщення енергетичного ККД у бік менших значень. Тобто швидкість випаровування водної компоненти буде тільки зменшуватися. Також у цьому випадку можливе спостерігання неадекватного збільшення гідравлічних втрат.

Більш правильним підходом підвищення якості роботи суднового сепаратора лляльних вод може бути касетний принцип компонування робочих камер – кавітаторів.

Висновки. 1. Принцип роботи кавітаційного сепаратора суднових лляльних вод базується на фазовому переході водної складової під впливом

на оброблюваний багатофазний потік кавітаційного поля в межах значень температури від 20 до 70 ^{0}C. Процес фазового переходу є регульованим, а кавітація може створюватися не тільки за рахунок вдування повітря або з використанням ультразвукових коливань.

2. Для трьох способів підтримки суперкавітації виконано оцінку ступеня ефективності процесу сепарації суднових лляльних вод. З енергетичної точки зору технологією є комбіноване використання ультразвуку з вентиляцією каверни.

Список літератури:

1. MARPOL 73/78 – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; 1973:584. URL: https://surl.li/neseys

2. Malakhov OV, Palagin OM, Naydyonov AI, Lykhoglyad KA, Bondarenko AV. New technology for ship bilge and oily water separation. *Engineering Reports*. 2024; 6 (4):e12751. DOI: 10.1002/eng2.12751

3. Marine oil water separator market size & share analysis – growth trends & forecasts (2023–2028). URL: https://surl.li/tktviz

4. Buitendijk M. Bilge water separators – where are we now? SWZ Maritime; 2022. URL: https://surl.li/dakzfx

Malakhov O.V., Nikolaieva L.L., Kiris O.V., Bondarenko A.V., Kozyryev I.P., Palagin O.M., Naydyonov A.I. **USE OF BIELDGE WATER ULTRASONIC SEPARATION ON VESSELS**

The problem of ship bilge water separation – a mixture of water with petrochemical products formed during the operation of water transport vessels is relevant and requires new methods for its solution. For this purpose, an analysis of the main features of the cavitation separation method was performed, which is based on the use of the principle of cold boiling of the flow due to the low value of its pressure in a locally selected area of the separator's working chamber. It is shown that cavitation can be created by using ultrasonic vibrations and artificial air injection into a moving flow. At the initial stage, the use of an ultrasonic source of low-pressure waves will lead to the first stage of bubble cavitation, and further ventilation of the cavity will allow it to be brought to the supercavitation mode – a continuous steam cavity. As a result of the research, it was shown that with artificial ventilation of the cavity during the treatment of ship bilge water, when switching to lower speeds of the water flow entering the separator, the value of the vaporization pressure increases. It was established that the pressure diagram in the water vapor extraction section should not contain sharp breaks in its contour. During the research, an assessment of the efficiency degree of the ship's bilge water separation process was performed. The efficiency was determined with three methods of cavitation support: hydrodynamic, ultrasonic, ultrasonic in combination with artificial ventilation of the cavity using air. A joint analysis of the results obtained allowed to identify numerical ranges of the optimal operating area of the separation unit. In this zone, the energy efficiency reaches its maximum values, the volumetric efficiency practically does not change, and the hydraulic efficiency changes very slightly. Conclusions were formulated about ways to improve the quality of the ship's bilge water separator.

Key words: *ship's bilge water, separation, ultrasonic cavitation, water vapor, operating range.*

УДК 629.5.018.7
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/48

Никитюк П.В.
Одеський національний морський університет

Мельник О.М.
Одеський національний морський університет

АДАПТИВНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ БАР'ЄРІВ БЕЗПЕКИ СУДНА ТА АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РИЗИКУ

У статті запропоновано підхід до оцінки експлуатаційного ризику морських суден на основі інтегрованої моделі адаптивного аналізу безпеки, яка враховує деградацію бар'єрів, змінність технічного стану підсистем та зовнішні фактори. Методологія базується на багаторівневій ймовірнісній схемі, що дозволяє моделювати часову динаміку ризику за допомогою узагальнених індикаторів: інтегрованого індексу ризику, запасу безпеки та прогнозованого часу до досягнення критичного стану. Розроблено нову систему формул з урахуванням експоненційної деградації бар'єрів безпеки, вагової значущості підсистем та динамічного оновлення ймовірностей відмов. Проведено симуляційне моделювання на прикладі трьох типів суден (балкер, контейнеровоз, танкер) у шести сценаріях експлуатації, зокрема критичних режимах, що дозволило продемонструвати адаптивність та прогностичну здатність моделі. Окрім технічної реалізації, особливу увагу в роботі приділено логіці сценарного аналізу, що охоплює як нормальні умови, так і стресові експлуатаційні режими. Використання адаптивного підходу дозволяє гнучко змінювати вагові коефіцієнти підсистем залежно від типу судна та його навантаження. Результати числового моделювання показали високу інформативність індексу як універсального індикатора наближення до критичного стану, що може бути використаний як ключовий параметр у системах підтримки прийняття рішень для морської галузі. Інтерпретація результатів включає часову еволюцію індексу ризику, момент перевищення критичних меж, динаміку запасу безпеки та прогноз часу реагування. Запропонована система може бути впроваджена в функціональні платформи управління безпекою морських суден, зокрема в режимі автономного плавання, а також як інструмент превентивної діагностики технічного стану в умовах багатофакторної невизначеності. Практична цінність моделі полягає у її здатності формувати рекомендації щодо адаптації маршруту, швидкості чи режиму експлуатації з метою мінімізації аварійних ситуацій.

Ключові слова: *морський транспорт, експлуатаційна безпека, багатофакторний аналіз, система підтримки прийняття рішень, оцінка ризику, бар'єри безпеки, процес навігації, технічний стан, деградація, критичний стан, прогнозування, адаптивне управління, автоматизація процесів, судноплавство, надійність системи, багатосценарне моделювання.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах експлуатації морських суден значно зростає складність процесу контролю та управління експлуатаційною безпекою суден через вплив динамічного середовища, технічну зношеність систем та кіберфізичні загрози. Зокрема, з розвитком автономного та автоматизованого судноплавства, вектор морської безпеки зміщується у бік інтегрованих технологічних рішень, що мають забезпечувати своєчасне виявлення загроз і адаптивне реагування. Класичні підходи до оцінки технічного стану підсистем часто не враховують часову деградацію бар'єрів безпеки, мультифакторність ризиків та необхідність прогнозу ймовірності настання критичного стану.

Водночас, експлуатаційна надійність морського транспорту все частіше базується на моделюванні взаємозалежностей між технічними системами, зовнішніми факторами середовища і функціонуванням захисних бар'єрів. У реальних умовах судноплавства, навіть незначні затримки у виявленні загроз можуть призвести до аварійних ситуацій із високими економічними, екологічними або людськими втратами. Таким чином, розроблення моделей, що дозволяють не лише діагностувати поточний стан, але й прогнозувати ризики із врахуванням деградації систем, є вкрай актуальним завданням для галузі.

У цьому контексті важливо формувати такі моделі, які дозволяють інтегрувати реальні або

синтетично наближені дані з вхідними параметрами підсистем, автоматизувати оцінку ризику в режимі реального часу, адаптувати вагові коефіцієнти критичності та забезпечувати інтелектуальне управління безпекою на борту судна. Розробка адаптивної системи, яка враховує часову динаміку та деградаційні процеси, дозволить істотно підвищити рівень морської безпеки в умовах постійної зміни зовнішніх та внутрішніх загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд вивчених за темою дослідження джерел свідчить про широке використання міждисциплінарних підходів до оцінювання експлуатаційних ризиків та безпеки морських суден, з особливим акцентом на роль бар'єрів безпеки, технологій прогнозування та управління ризиком. У роботі [1] розглянуто стратегії сталого виведення з експлуатації підводних трубопроводів, що має паралелі з концепціями деградації бар'єрів у морському середовищі. Наукова праця [2] аналізує досягнення цілей декарбонізації у морській індустрії, що актуалізує потребу в багатофакторному оцінюванні ризиків. Робота [4] пропонує графові методики для аналізу бар'єрів у нафтогазовій сфері, яка може бути адаптована до морських операцій. Автори в [5] представили огляд теоретичних моделей на основі теорії ігор та надійності, що надає аналітичну основу для моделювання взаємодії бар'єрів і систем. У [8] акцентують увагу на помилках людини в умовах автономного управління суднами, що підкреслює важливість включення людського фактору в адаптивну логіку ризик-менеджменту. Праці [19; 20] послідовно розвивають підхід до оцінки ефективності бар'єрів у динамічному морському середовищі, зокрема через імовірнісні мережі та моделі стійкості. Дослідження [21–24] зосереджуються на інформаційній взаємодії, дистанційному керуванні, супутникових системах та попередженні зіткнень, що суттєво доповнює технічну компоненту безпеки судноводіння і створює підґрунтя для формування інтегрованих моделей. Сукупно ці джерела формують комплексне бачення сучасних підходів до адаптивного управління безпекою морських суден у змінних умовах експлуатації.

Попри інтенсивний розвиток морських технологій, актуальним залишається питання забезпечення експлуатаційної безпеки суден в умовах змінного середовища, зносу технічних компонентів і зростання кількості автономних функцій. Існуючі моделі оцінювання ризиків здебільшого статичні, не враховують часову деградацію захисних бар'єрів та динаміку багатофакторного впливу зовнішніх і внутрішніх чинників. У більшості випадків, системи управління безпекою покладаються на фіксовані порогові значення параметрів, що не дозволяє вчасно виявляти критичні тенденції розвитку аварійних ситуацій.

Крім того, недостатньо реалізованими є інструменти, що поєднують прогнозування на основі часових рядів, адаптивну вагову оцінку критичних підсистем та алгоритмічну логіку реагування. Така ситуація обмежує можливості своєчасного втручання в управління судном, особливо у випадках комбінованого впливу технічних, навігаційних, інформаційних та екологічних загроз. Таким чином, виникає потреба в моделі, що дозволяє комплексно та в реальному масштабі часу оцінювати рівень експлуатаційного ризику, динамічно адаптувати управління та формувати підстави для автоматизованого реагування.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка адаптивної моделі оцінки експлуатаційної безпеки морських суден, яка дозволяє інтегрувати часову динаміку деградації захисних бар'єрів, технічний стан підсистем та зовнішні ризики в єдиний індекс ризику, а також формувати оперативні рішення щодо захисту та попередження критичних ситуацій. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання: розробити математичну модель з урахуванням імовірнісних залежностей та параметрів деградації; реалізувати алгоритм динамічного моніторингу стану підсистем і обчислення індексу ризику; здійснити верифікацію моделі на основі симульованих експлуатаційних сценаріїв; проаналізувати динаміку зміни ризику та оцінити ефективність системи в режимі прогнозування та адаптивного реагування.

У ході дослідження набуло подальшого розвитку науково-методичне забезпечення оцінки експлуатаційної безпеки морських суден шляхом впровадження адаптивної моделі, що поєднує ймовірнісну характеристику деградації бар'єрів безпеки із динамічним аналізом технічного стану підсистем. Удосконалено підхід до інтегрованого розрахунку індексу ризику (*SIRI*) з урахуванням зміни параметрів у реальному часі та впровадженням критерію прогнозованого часу досягнення критичного стану. Також запропоновано новий формат сценарного аналізу з використанням математичної формалізації впливу зовнішніх

факторів та результатів деградації безпеки на загальний рівень ризику.

Виклад основного матеріалу. Метою обраного методологічного підходу є формування нового обчислювального каркасу, який дозволяє здійснювати адаптивну оцінку експлуатаційного ризику судна з урахуванням часової динаміки деградації бар'єрів, взаємодії підсистем та впливу змінного середовища. Методологія ґрунтується на ідеї багаторівневого оцінювання, де кожен рівень відповідає окремому компоненту ризику: технічному стану, ефективності бар'єрів, зовнішнім умовам, а також інтеграційним індикаторам безпеки. У якості базової логіки прийнято синтез імовірнісних та функціональних залежностей, що дозволяє охопити як статичні показники, так і динамічні зміни.

На відміну від класичної моделі індексу інтегрованої безпеки (*SIRI*), що передбачає незалежну оцінку компонент, новий підхід включає елементи міжсистемного впливу, зокрема, каскадні ефекти ризику та функцію посилення зносу залежно від рівня зовнішніх навантажень. Крім того, додається новий індикатор індекс накопичення загрози, який моделює потенційно латентні процеси у підсистемах. Методика також враховує адаптивне оновлення вагових коефіцієнтів у режимі реального часу та прогнозне моделювання з використанням згладжених часових рядів. У підсумку такий підхід дозволяє більш точно передбачати майбутні стани безпеки судна та розробляти рекомендації щодо превентивного реагування не небезпеки.

Методологічний підхід до оцінки експлуатаційного ризику судна базується на побудові багаторівневої моделі, яка враховує технічний стан підсистем, ефективність захисних бар'єрів та вплив зовнішніх умов. На початковому етапі формується обчислювальний каркас, що забезпечує структуровану взаємодію між усіма компонентами моделі.

Схема охоплює три ключові рівні: технічний стан систем, ефективність бар'єрів, а також змінні зовнішні умови (морське середовище, навігаційна складність тощо). Всі ці елементи об›єднуються через функції розрахунку ризику, нормалізуються в індекси ($S(t)$, $SIRI(t)$, $M(t)$) та формують єдиний інтегрований показник безпеки. Такий підхід дозволяє не лише оцінити поточний стан, а й враховувати часову динаміку, що є критично важливим у сучасних умовах морських операцій.

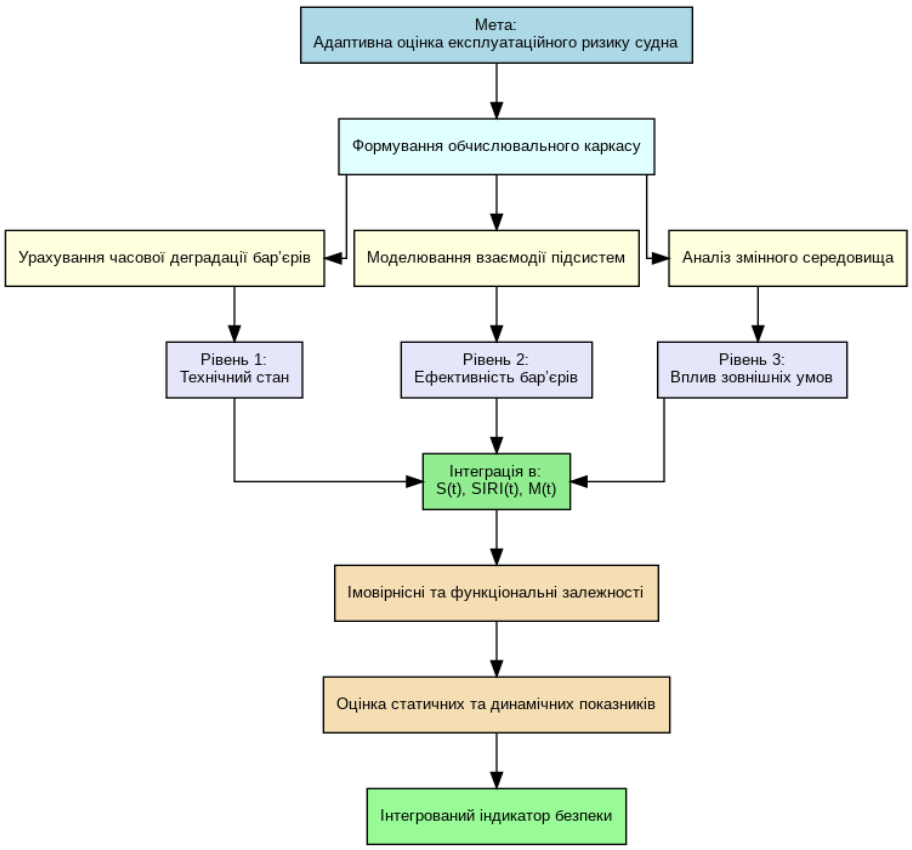


Рис. 1. Методологічний підхід до адаптивної оцінки експлуатаційного ризику судна

Як показано на схемі, адаптивна оцінка базується на імовірнісних та функціональних залежностях, які дозволяють гнучко враховувати зміну технічних і середовищних параметрів. Застосування такого підходу є важливою складовою сучасних систем цифрових двійників та кіберфізичних платформ, орієнтованих на забезпечення сталого та безпечного функціонування морського транспорту.

У підсумку, отриманий інтегрований індикатор безпеки може використовуватись для:

– автоматизованого моніторингу стану судна;
– прогнозування критичних подій на борту;
– ухвалення превентивних рішень з боку екіпажу або за допомогою автоматизованих системам.

Математична модель адаптивної оцінки експлуатаційного ризику судна. Запропонована в цієї роботі математична модель є розвитком класичних імовірнісних підходів до оцінки технічного стану морських суден та ефективності функціонування захисних бар'єрів. Основною ідеєю моделі є динамічний аналіз взаємозалежності підсистем у часовому вимірі з урахуванням деградаційних процесів, інтерференційного впливу між компонентами суднової системи та накопичення ризику в часі. Модель також дозволяє формалізовано визначати адаптивний запас безпеки, градієнт зміни ризику та час до досягнення критичного рівня, що є основою для запуску механізмів превентивного реагування. У якості структурної основи обрано модульну формалізацію, що дозволяє масштабувати модель під різні архітектури суден та варіативні сценарії експлуатації.

В моделі інтегровано часову деградацію захисних бар'єрів, взаємодію між підсистемами судна та накопичення ризику в часі для формування інформативного індексу безпеки, що дозволяє не лише оцінити поточний стан системи, а й прогнозувати наближення до критичних умов, що є основою для активізації адаптивних механізмів реагування.

Початкова оцінка ймовірності критичної ситуації здійснюється з урахуванням технічного стану підсистем і початкової ефективності бар'єрів:

$$P_0(R) = \sum_{j=1}^{n} \beta_j \cdot P(C_j) \cdot \left(1 - E_{B_j}(0)\right). \quad (1)$$

Зниження ефективності бар'єрів моделюється експоненційною функцією деградації:

$$E_{B_j}(t) = E_{0j} \cdot e^{-\lambda_j \cdot t}. \quad (2)$$

Враховуючи деградацію та зміну параметрів стану з часом, оновлюється оцінка ймовірності критичного розвитку подій:

$$P_t(R) = \sum_{j=1}^{n} \beta_j(t) \cdot P(C_j, t) \cdot \left(1 - E_{B_j}(t)\right). \quad (3)$$

Для коректного відображення реального середовища враховується міжпідсистемний вплив тобто коли ризики в одній підсистемі можуть посилювати інші:

$$I_j(t) = \sum_{k=1}^{m} \gamma_{jk} \cdot R_k(t). \quad (4)$$

Отже, локальний ризик підсистеми моделюється як сума її базового ризику та впливу інших:

$$R_j(t) = P(C_j, t) \cdot \left(1 - E_{B_j}(t)\right) + I_j(t). \quad (5)$$

Агрегований рівень ризику всієї системи формується як зважена сума всіх локальних ризиків:

$$S(t) = \sum_{j=1}^{n} w_j(t) \cdot R_j(t). \quad (6)$$

Цей рівень нормалізується для отримання узагальненого індикатора *SIRI* (інтегрований індекс ризику):

$$SIRI(t) = \frac{S(t)}{S_{max}}, \quad S_{max} = \sum w_j(t). \quad (7)$$

Накопичений вплив ризику за останній період (з ефектом згасання) відображає глибину системної загрози:

$$TIA(t) = \int_0^t S(\tau) \cdot e^{-\mu(t-\tau)} d\tau. \quad (8)$$

На цій основі обчислюється адаптивний запас безпеки з урахуванням накопиченого ризику:

$$M(t) = S_{cr} - SIRI(t) - \kappa \cdot TIA(t). \quad (9)$$

Далі оцінюється градієнт зміни ризику, який використовується для прогнозу наближення до критичного стану:

$$\frac{dS}{dt} \approx \frac{S(t + \Delta t) - S(t)}{\Delta t}. \quad (10)$$

Час до досягнення критичного порогу визначається як відношення запасу безпеки до швидкості зміни ризику:

$$T_{crit} = \frac{M(t)}{dS/dt}. \quad (11)$$

Якщо індекс ризику перевищує поріг або час до небезпечного стану занадто малий, активується система безпеки:

$$\text{if } SIRI(t) > S_{cr} \text{ or } T_{crit} < T_{\text{РЕАКЦ}} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \text{Trigger Safety Protocol} \quad (12)$$

Таким чином, модель дозволяє здійснювати комплексну адаптивну оцінку ризику з можливістю раннього виявлення критичних станів і автоматичного реагування на їх наближення.

З метою реалізації моделі адаптивного оцінювання експлуатаційного ризику морського судна, у розрахункову схему були закладені основні параметри, що відображають технічний стан підсистем, динаміку деградації бар'єрів безпеки та інтеграцію взаємозв'язків. У таблиці подано опис ключових змінних, типові діапазони значень та одиниці вимірювання, що використовуються при моделюванні. Зокрема, $P(C_j)$ представляє ймовірність відмови *j*-ої підсистеми, яка в типових умовах варіюється в межах 0.05–0.15. Початкова ефективність бар'єру E_{0j} задається у межах 0.80–0.95 і знижується за експоненційною закономірністю відповідно до коефіцієнта деградації λ_j, який зазвичай приймає значення від 0.005 до 0.02 (1/год).

Коефіцієнти β_j та w_j визначають критичність і вагомість кожної підсистеми, що впливає на загальний індекс ризику; їх значення зазвичай складають 0.2–0.4. Міжпідсистемні взаємозв'язки описуються через γ_{jk}, де типовий інтервал значень становить від 0 до 0.3. Порогове значення критичного рівня безпеки S_{cr} зазвичай встановлюється на рівні 0.05, а вплив накопиченого ризику враховується через коефіцієнти μ (спадання пам'яті, 0.05–0.2 1/год) і κ (інтеграційна вага, 0.2–0.5).

Крок симуляції Δt приймається рівним одній хвилині, а $T_{\text{реакц}}$ (час реакції системи) задається в інтервалі 5–10 хвилин, залежно від типу судна та оперативних вимог. Такий набір параметрів дозволяє забезпечити точну і стабільну роботу моделі при варіативних сценаріях експлуатації.

Дані з представленої таблиці можуть бути використані для встановлення вихідних умов у симуляційних експериментах, а також як основа для побудови сценаріїв ризикового розвитку подій у межах даної моделі та дозволяють адаптивно налаштовувати модель під різні класи суден, режими експлуатації та обмеження навколишнього середовища.

Методика моделювання. Метою даного етапу є числова реалізація адаптивної математичної моделі оцінки експлуатаційного ризику судна з урахуванням часової динаміки та міжпідсистемних взаємодій. Методика побудована на основі сценарного підходу, в якому розглядаються різні варіанти функціонування судна від номінального до умов погіршення технічного стану або деградації бар'єрів безпеки.

Моделювання виконується у дискретному часовому форматі з кроком симуляції Δt = 1 хв. Для кожного моменту часу здійснюється оновлення параметрів, що характеризують стан підсистем, ефективність бар'єрів та інтегрований ризик. Основними етапами реалізації є: ініціалізація параметрів, розрахунок деградації ефективності, оцінка локального та системного ризику, нормалізація до індексу *SIRI*, обчислення запасу безпеки та часу до критичного рівня. Додатково, при кожному кроці перевіряються умови активації адаптивної реакції системи.

Алгоритм реалізовано в середовищі Python 3.11 із використанням бібліотек NumPy, Pandas (для обробки даних), та SciPy (для чисельного інтегрування). Генерація параметрів та синтетичних сценаріїв реалізована через

Таблиця 1

Основні параметри адаптивної моделі оцінки експлуатаційного ризику

Параметр	Опис	Типові значення	Одиниці виміру
$P(C_j)$	Ймовірність відмови *j*-ої підсистеми	0.05 – 0.15	-
E_{0j}	Початкова ефективність бар'єру	0.80 – 0.95	-
λ_j	Коефіцієнт деградації бар'єру	0.005 – 0.02	1/год
β_j	Коефіцієнт критичності підсистеми	0.2 – 0.4	-
γ_{jk}	Коефіцієнт впливу між підсистемами	0 – 0.3	-
w_j	Ваговий коефіцієнт підсистеми	0.2 – 0.4	-
S_{cr}	Критичний поріг ризику	0.05	-
μ	Коефіцієнт спадання пам'яті ризику	0.05 – 0.2	1/год
κ	Коефіцієнт ваги накопиченого ризику	0.2 – 0.5	-
Δt	Крок симуляції за часом	1	хв
$T_{\text{реакц}}$	Час порогу реагування	5 – 10	хв

контрольовані випадкові вибірки в рамках допустимих діапазонів із Таблиці 1, що дозволило протестувати модель у багатьох варіаціях режимів роботи судна, включаючи пошкодження, перевантаження або втрату бар'єру.

У рамках проведення імітаційного моделювання експлуатаційного ризику морських суден були визначені три репрезентативні типи суден, що відповідають основним категоріям вантажоперевезень: балкер середнього тоннажу, контейнеровоз середньої місткості та універсальний танкер. Для кожного типу судна сформовано три сценарії функціонування: базовий, комбінований та критичний. Базовий сценарій описує штатну експлуатацію судна в стабільних умовах без впливу зовнішніх чи внутрішніх порушень. Комбінований сценарій відображає наявність одночасного впливу декількох факторів ризику (наприклад, технічний збій та несприятливі метеоумови), що значно ускладнюють підтримання належного рівня безпеки. Критичний сценарій включає екстремальні умови, такі як повна втрата керування, відмова систем живлення або вплив кіберзагроз, що потенційно можуть призвести до катастрофічних наслідків, якщо не буде здійснено адекватного реагування (Табл. 2).

Представлені сценарії виступають основою для симуляційної оцінки динаміки ризику, деградації бар'єрів безпеки та функціонування системи адаптивного реагування на загрози. У подальшому вони будуть використані для формування часового ряду та верифікації індикаторів безпеки.

Алгоритм реалізації моделі. Розрахунки виконуються поетапно для кожного моменту часу симуляції (t_0,t_1,...,t_n) у відповідності до заданого сценарію. Алгоритм моделювання включає такі ключові кроки:

1. Ініціалізація вхідних параметрів: задаються $P(C_j)$, E_{0j}, λ_j, w_j, γ_{jk}, β_j на основі Таблиці 1.

2. Обчислення ефективності бар'єрів: використовується експоненційна формула деградації $E_{Bj}(t)=E_{0j}\cdot e^{-\lambda jt}$.

3. Оцінка локального ризику: виконується розрахунок $R_j(t)=\beta_j\cdot P(C_j)\cdot(1-E_{Bj}(t))$.

4. Обчислення загального ризику: здійснюється агрегація із врахуванням міжпідсистемних впливів γ_{jk} та вагових коефіцієнтів w_j.

5. Оновлення накопиченого ризику: з урахуванням коефіцієнта пам'яті μ та ваги накопичення κ.

6. Нормалізація до індексу $SIRI(t)$: для кожного моменту часу обчислюється інтегрований ризик та його похідні.

7. Оцінка запасу безпеки $M(t)$ та часу до критичного рівня T_{crit}.

8. Перевірка активації адаптивної реакції: якщо $SIRI(t)>S_{cr}$ або $T_{\text{crit}}<T_{\text{реакц}}$, активується система реагування.

9. Прогнозування: модель може бути доповнена LSTM-прогнозом майбутніх ризиків (опційно).

10. Циклічне оновлення: переходить до наступного часового кроку.

Моделювання сценаріїв та аналіз результатів. У даному підрозділі представлено результати чисельного моделювання шести репрезентативних сценаріїв експлуатації морських суден. В якості об'єктів дослідження розглядалися три типи суден: балкер (35000 т дедвейт), контейнеровоз (5000 TEU) та танкер (50000 т дедвейт). Для кожного типу сформовано по два сценарії: умовно-нормативний (базовий/комбінований) та критичний, що моделюють погіршення технічного стану, втрату потужності, навігаційні або енергетичні відмови, деградацію безпекових бар'єрів, а також їхні комбіновані впливи.

Графік на рис. 2 ілюструє динаміку зміни інтегрованого індексу ризику $SIRI(t)$ протягом 120 хвилин симуляції для кожного сценарію.

Таблиця 2

Сценарії моделювання для різних типів суден

Тип судна	Характеристика	Базовий сценарій	Комбінований сценарій	Критичний сценарій
Балкер	DWT 35000 т (дедвейт)	Номінальний режим	Відмова головного двигуна + погіршення погоди	Втрати зв'язку + системи електро постачання
Контейнеровоз	5000 TEU (контейнеромісткість)	Номінальний режим	Збій процесу навігації + деградація бар'єру	Втрата керування + технічна деградація
Танкер	DWT 50000 т (дедвейт)	Номінальний режим	Втрата остійності + кіберінцидент	Збої в енергосистемі + порушення герметичності корпусу

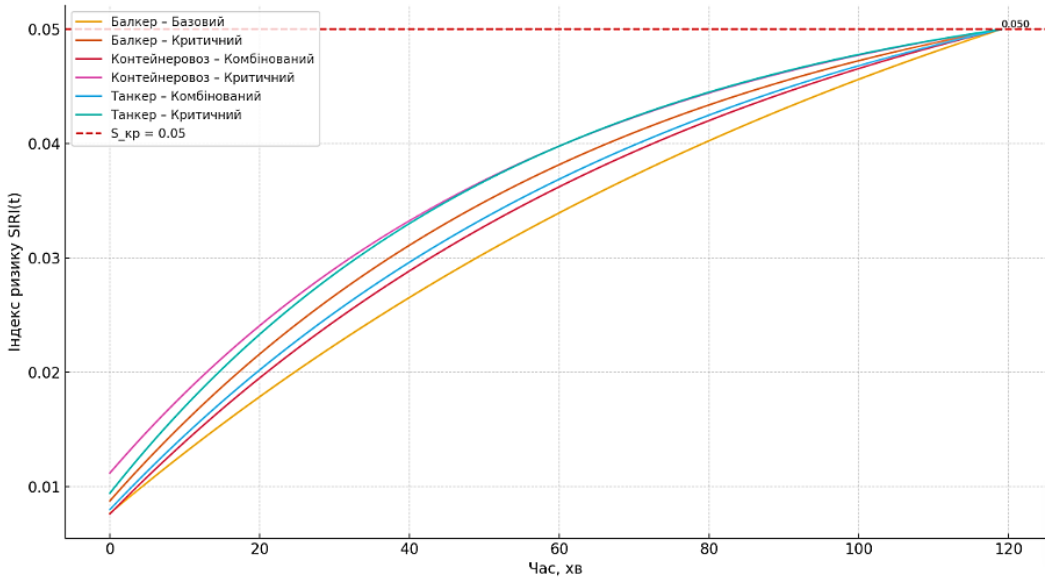


Рис. 2. Інтегрований індекс ризику SIRI(t) для шести сценаріїв

Криві побудовані на основі розрахунку ефективності безпекових бар'єрів за експоненційним законом деградації та локального ризику підсистем з наступною агрегацією у загальну метрику. Нормалізація результатів до критичного рівня S_{cr} = 0.05 дозволяє виявити моменти, коли система переходить до потенційно небезпечного стану.

Як видно з графіка, у базовому сценарії для балкера ризик залишається на безпечному рівні протягом усього часу. Для контейнеровоза у комбінованому сценарії спостерігається повільне, але стабільне зростання ризику, тоді як критичний сценарій демонструє стрімке наближення до граничного значення вже після 40–50 хвилин. Схожа картина характерна і для танкера в умовах комбінованих загроз рівень *SIRI* зростає поступово, а у критичному режимі перевищення S_{cr} фіксується приблизно на 60-й хвилині.

Такий аналіз підтверджує ефективність моделі у виявленні ризиконебезпечних сценаріїв протягом експлуатаційного періоду та демонструє її чутливість до параметрів деградації бар'єрів і частоти збоїв у підсистемах.

Висновки. Запропонована інтегрована модель адаптивної оцінки ризику морських суден продемонструвала здатність до динамічного виявлення небезпечних станів, адаптації до технічних змін та прогнозування кризових сценаріїв. Формалізація індикаторів ризику дозволила побудувати узагальнений алгоритм прийняття рішень на основі реального стану підсистем. Моделювання на прикладі типових суден підтвердило високу чутливість моделі до змін параметрів та її придатність до практичного використання. Результати дозволяють створити ефективну основу для інтелектуальних підтримки прийняття рішень у сфері морської безпеки. У перспективі модель може бути розширена для роботи з сенсорними даними, багатофакторними структурами та сценаріями для розвитку автономного судноплавства.

Список літератури:

1. Reda A., Victor Amaechi C., Shahin M.A. Optimization approach for sustainable decommissioning of unpiggable subsea pipelines: Insights from the Arabian Gulf *Journal of Environmental Management*. 2025. Т. 375. Ст. 124180.

2. Li Y., Yuen K.F., Zhou Y. Risk assessment of achieving greenhouse gas emission reduction target in the maritime industry *Transport Policy*. 2024. Т. 155. С. 29–46.

3. Maturana M.C., Martins M.R., Frutuoso e Melo P.F.F. Application of a quantitative human performance model to the operational procedure design of a fuel storage pool cooling system *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Т. 216. Ст. 107989.

4. Choueri N. Jr., Jaculli M.A., Leite A.G.A.S., Mendes J.R.P. Use of graphs to assess well safety in drilling projects and during operations by identification of available barrier elements and consolidation of barrier envelopes *Petroleum Research*. 2024. Т. 9, № 3. С. 418–431.

5. Hausken K., Welburn J.W., Zhuang J. A review of game theory and risk and reliability analysis in infrastructures and networks *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Т. 261. Ст. 111123.

6. Li X., Yuen K.F. A human-centred review on maritime autonomous surface ships: Impacts, responses, and future directions *Transport Reviews*. 2024. Т. 44, № 4. С. 791–810.

7. Cheng T. та ін. Analysis of human errors in human-autonomy collaboration in autonomous ships operations through shore control experimental data *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Т. 246. Ст. 110080.

8. Tamburini F., Iaiani M., Cozzani V. Analysis of system resilience in escalation scenarios involving LH2 bunkering operations *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Т. 257. Ст. 110816.

9. Zhu T. та ін. A risk assessment framework for water electrolysis systems: Mapping System Theoretic Process Analysis (STPA) and Event Tree Analysis (ETA) into Fuzzy Bayesian Networks (FBN) *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Т. 194. С. 306–323.

10. Burgén J., Bram S. Safety on automated passenger ships: Exploration of evacuation scenarios for coastal vessels *Maritime Transport Research*. 2024. Т. 6. Ст. 100110.

11. Yang X., Haugen S. Risk information for operational decision-making in the offshore oil and gas industry *Safety Science*. 2016. Т. 86. С. 98–109.

12. Tatar U. та ін. Charting new waters with CRAMMTS: A survey-driven cybersecurity risk analysis method for maritime stakeholders *Computers & Security*. 2024. Т. 145. Ст. 104015.

13. Stefana E., Ramos M., Paltrinieri N. Machine learning-based literature review on the concept of safety barriers against hazardous events *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024. Т. 92. Ст. 105470.

14. Yang X., Haugen S., Paltrinieri N. Clarifying the concept of operational risk assessment in the oil and gas industry *Safety Science*. 2018. Т. 108. С. 259–268.

15. Yousaf A. та ін. Cyber risk assessment of cyber-enabled autonomous cargo vessel *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2024. Т. 46. Ст. 100695.

16. Aziz A. та ін. Operational risk assessment model for marine vessels *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Т. 185. С. 348–361.

17. Nakashima T., Kureta R., Khastgir S. Addressing systemic risks in autonomous maritime navigation: A structured STPA and ODD-based methodology *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Т. 261. Ст. 111041.

18. Deng W., Ma X., Qiao W. A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Т. 243. Ст. 109884.

19. Deng W., Ma X., Qiao W. Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Т. 139. Ст. 104581.

20. Мельник О.М., Корякін К.С., Логінов О.В. Супутникові компаси у системі забезпечення безпеки навігації суден Розвиток транспорту. 2022. № 1 (12). С. 54–63.

21. Мельник О.М., Онищенко О.А., Васалатій Н.В., Корякін К.С., Пуляєв І.О., Щенявський Г.С. Технології інформаційної взаємодії у процесі підвищення безпеки мореплавства Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Т. 33, № 4 (72). С. 260–265.

22. Мельник О.М., Волошин А.О., Онищенко О.А., Щербина О.В., Васалатій Н.В., Никитюк П.В. Організація забезпечення інформаційної безпеки морського судна Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2022. № 201. С. 69–78.

23. Мельник О.М., Онищенко О.А., Волошин А.О., Васалатій Н.В., Логінов О.В., Корякін К.С. Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства Розвиток транспорту. 2022. № 3 (14). С. 179–191.

24. Мельник О.М., Калініченко Є.В., Бурлаченко Д.А., Никитюк П.В., Колесник О.В. Забезпечення безпеки судноводіння шляхом розроблення стратегій попередження зіткнення на базі «моделі відкритого моря» Водний транспорт. 2023. № 1 (37). С. 71–79.

Nykytyuk P.V., Melnyk O.M. ADAPTIVE ASSESSMENT OF SHIP SAFETY BARRIER DEGRADATION AND OPERATIONAL RISK ANALYSIS

The article proposes an approach to assessing the operational risk of seagoing vessels based on an integrated model of adaptive safety analysis that considers the degradation of barriers, the variability of the technical condition of subsystems and external factors. The methodology is based on a multilevel probabilistic scheme that allows modeling the time dynamics of risk using generalized indicators: an integrated risk index, safety margin, and the predicted time to reach a critical state. A new system of formulas has been developed, considering the exponential degradation of safety barriers, the weighting of subsystems and the dynamic update of failure probabilities. Simulation modeling was carried out on the example of three types of ships (*bulk carrier, container ship, tanker*) *in six operating scenarios, including critical modes, which allowed to*

demonstrate the adaptability and predictive ability of the model. In addition to the technical implementation, special attention is paid to the logic of scenario analysis, which covers both normal and stressful operating conditions. An adaptive approach allows for flexible changes in the weight coefficients of subsystems depending on the type of vessel and its load. The results of numerical modeling have shown the high informativeness of the index as a universal indicator of approaching a critical condition, which can be used as a key parameter in decision support systems for the maritime industry. Interpretation of the results includes the time evolution of the risk index, the moment of exceeding the critical limits, the dynamics of the safety margin, and the forecast of response time. The proposed system can be implemented in digital platforms for managing the safety of marine vessels, in particular in autonomous navigation, as well as a tool for preventive diagnostics of technical condition under conditions of multifactorial uncertainty. The practical value of the model lies in its ability to generate recommendations for adapting the route, speed, or mode of operation to minimize emergencies.

Key words: *maritime transport, operational safety, multifactor analysis, decision support system, risk assessment, safety barriers, navigation process, technical condition, degradation, critical condition, forecasting, adaptive control, process automation, shipping, system reliability, multi-scenario modeling.*

УДК 656.615.073:621.592.7
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/49

Столянов В.А.
Одеський національний морський університет

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РЕГІОНУ ОБСЛУГОВУВАННЯ РЕЖИМНИХ ВАНТАЖІВ В УНІВЕРСАЛЬНИХ КОНТЕЙНЕРАХ ІЗ ТЕРМОВКЛАДИШАМИ І КРІОГАЗИФІКАТОРАМИ

У даному дослідженні було проведено роботу щодо розрахунку та визначення максимально допустимих відстаней перевезення рефрижераторних вантажів у класичних контейнерах, які було тимчасово переобладнано в рефрижераторні шляхом встановлення в них термовкладишу, балонів із зрідженою кріогенною речовиною та системи підтримання необхідної температури.

В процесі роботи над виконанням цілі дослідження було проаналізовано різні наукові джерела щодо роботи кріогенних охолоджуючих систем, їхні характеристики та ефективність використання охолоджуваної рідини в умовах високих температур зовнішнього середовища та обмеженої кількості холодоагенту.

Також було розглянуто різні транспортно-технологічні системи (ТТС) доставки продовольчих вантажів (ПВ) у запропонованому раніше типі інтермодальної транспортної одиниці (ІТО). З них як найбільш вдала виділяється саме фідерна ТТС, що забезпечує ефективну та надійну роботу суден-контейнеровозів (які є невід'ємною складовою будь-якої ТТС при інтермодальному сполученні) на коротких та середніх відстанях. Після вибори потрібної ТТС за допомогою методу аналітичної ієрархії було проведено вибір найбільш вдалої моделі судна-контейнервоза. Вибір проводився за трьома критеріями для чотирьох типів суден-контейнеровозів серед класу «Feeder», «Feeder Max» та «Handy». Усі запропоновані критерії оцінювали ефективність кожного типу судна працювати у фідерному сервісі з мінімальними термінами доставки ПВ.

Обравши найкращий тип судна, на основі його техніко-експлуатаціних характеристик та раніше проведеного дослідження щодо часових меж роботи кріогенної установки, було проведено розрахунок допустимої відстані морського перевезення вантажу на прикладі замороженого м'яса у 20-фут переобладнаному контейнері. Розрахунки показали, що за температури близько +50 град. Цельсію в середньому вантаж може подолати відстань у близько 2000 морських миль без додаткових операцій з дозаправки, що відповідає перевезенням у таких морських басейнах, як Балтика, Північне і Середземне та Чорне моря, Східне узбережжя Атлантики в Європі чи басейн Східно та Південно-китайського і Японського морей в Азії.

Ключові слова: *транспортно-технологічна система, морське перевезення, судно-контейнеровоз, контейнер, відстань перевезення, час рейсу, інтермодальні перевезення, контейнерні перевезення, лінійне судноплавство, режимні вантажі, рефрижераторні вантажі, інтермодальна транспортна одиниця.*

Постановка проблеми. Згідно із статистикою, наведеною Taylor & Francis Group, 90% світового вантажообігу припадає на морські перевезення. З них 35% припадає на контейнерні перевезення [1]. Завдяки динамічному розвитку економік Індії, Китаю, країн ЄС, США, Японії та ін., на узбережжях цих країн виникла потужна сітка портової інфраструктури. Збільшення обсягів торгівлі між вищевказаними країнами безпосередньо призводить до збільшення інтенсивності вантажоперевезень. А завдяки глобальній стандартизації та автоматизації промисловості ці перевезення все більше й більше стають контейнерними та якомога швидшими, особливо в секторі перевезення продуктів харчування та сировини для їх виробництва. [2]

При цьому, спираючись на результати дослідження в роботі [3] в якому детально наводяться основні вимоги щодо технологічного обладнання контейнера із залученням термовкладишу та кріогазифікатору, а також визначений максимально припустимий час знаходження вантажів за відповідною технологією та відповідно до публікації [4] відомо, що час роботи запропонованої установки, як і кріоконтейнерів в цілому, є досить обмеженим. Рефрижераторні контейнери з витрачуваним холодоагентом (сухий лід,

рідкий двооксид вуглецю, рідкий азот і евтектичні акумулятори-зеротори) використовують головним чином для перевезення на невеликі відстані, бо контейнери не мають запасу охолоджувальної речовини більш ніж на один тиждень. Віддаленіші маршрути потребуватимуть створення мережі проміжних станцій для до заряджання контейнерів [4].

Також важливим фактором для доставки продовольчих вантажів в інтермодальному сполученні є швидкість обраних транспортних засобів згідно їх паспортних характеристик та правильний вибір інтермодального сервісу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основна увага рефрижераторним контейнерам та іншим ІТО з рідким охолодженням приділена в роботі [4]. У роботі [4] надається загальний опис та класифікація рефрижераторних контейнерів, вказуються їх ключові технічні характеристики і способи роботи різних систем охолодження, переваги і недоліки їх використання у міжнародних перевезеннях. При цьому основна увага приділяється саме класичним реф ІТО з машинним охолодженням, а ІТО з рідким холодоагентом згадуються лише в класифікації за типом холодильної установки з використанням загальних фраз, наприклад, невеликі відстані [4]. У роботі [4] також детально описуються різні холодильні установки як на морських суднах в цілому, так і для морських контейнерів з різними системами охолодження. Надаються схеми розміщення холодильного обладнання для ІТО і циркулювання охолодженого повітря всередині. Надано схему розташування азотної системи охолодження, що розташована в окремому відсіку замість машинної установки. Що стосується відстані перевезення, автори у роботі [4] зазначають, що контейнер з рідким охолодженням застосовується на дальності перевезення до 1000 км.

Що стосується досліджень в області інтермодальних сервісів, цікавою є робота [5], де автор аналізує та порівнює різні транспортно-технологічні системи (ТТС), які активно використовують на морському транспорті. В роботі надано принципи роботи, переваги кожної ТТС та способи їх застосування. Особливо цікавим є розділ щодо фідерної ттс, що передбачає використання невеликих суден (фідерів) для транспортування дрібних партій вантажів з внутрішніх мілководних річкових портів з метою їх консолідації у вантажних центрах (крупних портах) або для вивезення вантажів дрібними відправками з таких центрів. Автор роботи [5] зазначає, що фідерну систему фахівці розглядають як один із шляхів розвитку контейнерних перевезень, яка краще реалізує технологію доставки вантажів «від дверей до дверей». Крім того, відмічають екологію як фактор, що буде сприяти попиту на доставку вантажів на короткі морські відстані завдяки мінімізації шкідливих викидів у атмосферу. Окрім цього досить детальний аналіз роботи фідерних ліній та суден-контейнеровозів представлено у науковій праці [6], де надається організаційно-технічна структура магістрально-фідерного сполучення в контейнерній ТТС, проведено якісний аналіз ознак фідерних ліній від магістральних. Також графічно надано представлення схеми роботи суден на фідерних сервісах, визначено завдання роботи контейнерного флоту, охарактеризовано якісні та кількісні елементи контенеропотоків та створено концептуальну модель прийняття рішень з організації фідерної контейнерної судноплавної лінії [6].

Постановка завдання. Враховуючи аналіз існуючої наукової літератури можна зрозуміти, що питання роботи та практичного використання ІТО з рідким охолодженням та холодоагентом вивчалось досить поверхнево в області визначення більш точних меж щодо часу та відстані роботи таких контейнерів. Хоча автори в цілому і вказують правдиві значення тривалості та відстані перевезення, як в роботі [4], робиться це максимально загально без доказових розрахунків чи посилань на методологію визначення цих коротких відстаней. При цьому транспортна галузь все більше уваги приділяє саме фідерному сервісу для контейнерних інтермодальних перевезень, які застосовують якраз на короткі та середні відстані, де ІТО з рідким охолодженням вважаються найбільш ефективними і конкурентно спроможними. Тож основними завданнями цього дослідження є:

– Надати визначення поняттю фідерного сервісу і його переваг при використанні запропонованого у роботі [3] ІТО з рідким охолодженням;

– Обрати найбільш ефективний тип судна-контейнеровоза, який буде використовуватись для перевезення таких ІТО;

– Надати спосіб визначення відстані перевезення продовольчих вантажів у переобладнаному ІТО, спираючись на часові обмеження роботи кріогенної установки [3].

Виклад основного матеріалу. Згідно з [6] фідерний сервіс визначений як такий, «який полягає в перевезенні вантажів середньотонажними суднами (Feeder Ship), які працюють на

фідерних лініях між базовими (магістральними) и підживлюючими (фідерними) портами відповідного регіону. Компанії, які організують подібні лінії, здійснюють фідерне обслуговування однієї чи декількох магістральних сервісів, пропонуючи оренду значної частки своїх суден для вантажів клієнтури магістрального перевізника. Таким чином, фідерний сервіс полягає в перевезенні контейнерних вантажів мало- і середньотонажними суднами, які працюють на регіональних лініях між портами-хабами і регіональними, фідерними портами відповідного регіону. Розподіл перевізників на «фідерних» і «магістральних» – доволі умовний, є такі лінійні судноплавні підприємства, які можуть працювати як на магістральному сервісі, так і фідерному: все ж більш поширеними є форми організації, коли регіональні судноплавні компанії забезпечують фідерне обслуговування для глобальних перевізників [7]. Залежно від обсягу попиту, глобальні перевізники можуть обслуговувати вантажовласників власними суднами, чи вдаватися до послуг дочірньої фідерної лінії або користуватися фідерним сервісом третіх осіб [8].

У процесі міжнародних вантажних перевезень фідерна система дозволяє поєднувати різні види транспорту (наприклад, річковий і морський), обслуговують короткі та середні водні відстані з дрібнопартіонними вантажами, що надходять з дрібних пунктів чи недостатньо обладнаних портів на внутрішніх водних шляхах до крупних морських портів, для консолідації перед наступною відправкою на лінійних морських чи океанських суднах. Вони також забезпечують і зворотний процес вивезення водним шляхом вантажів дрібними партіями з вантажних центрів (крупних портів) на невеликих суднах (фідерах, касетовозах) до мілководних морських та річкових портів.Зокрема, фідерна система дозволяє судноплавним компаніям ефективно накопичувати та вивозити генеральні вантажі, які перевозяться морським транспортом на регулярних судноплавних лініях в контейнерах [5]. Нині фідерну систему фахівці розглядають як один із шляхів розвитку контейнерних перевезень, яка краще реалізує технологію доставки вантажів «від дверей до дверей». Крім того, відмічають екологію як фактор, що буде сприяти попиту на доставку вантажів на короткі морські відстані завдяки мінімізації шкідливих викидів у атмосферу. Основними перевагами фідерного сервісу є [6–7]:

– Гнучкість щодо планування роботи власного флоту. магістральні лінії є більш сталими за архітектурою сервісної мережі; зазвичай вони планують свою діяльність на середні і довгострокові періоди, так як їх сервіси вимагають значних капітальних вкладень. Фідерні лінії більш гнучкі для адаптації планової діяльності відповідно до змін на ринку. Фідерні лінії, як правило, оперують невеликим флотом, з фіксованою кількістю власних суден і врівноважують кількість необхідного тоннажу фрахтуванням. Таким чином, вони можуть мінімізувати капітальні вкладення, створюючи мережу фідерних маршрутів, гнучку до змін на ринку.

– Адаптованість розкладу. Фідерні лінії коректують розклади. За допомогою гнучких розкладів фідерні лінії легше адаптуються до сезонних коливань попиту, що сприяє значному скороченню тривалості доставки з місць постачання.

– Додатковий прибуток для судноплавних ліній та розширення географії. Потреба в фідерних перевезеннях існує в мілководних регіонах, де крупні океанські (морські) контейнеровози не можуть підійти до причалу. Тому контейнери завантажують на фідерний контейнеровоз і доставляють у найближчий великий порт. Фідерні контейнеровози відрізняються від морських меншою місткістю і локальним використанням.

Вибір типу судна для перевезення рефрижераторних ІТО з рідким охолодженням. Для визначення, який тип судна-контейнеровоза буде найбільш вдалим для перевезення ІТО з рідким охолодженням, сформулюємо спочатку критерії, за якими буде проведено оцінку запропонованих типів суден та надамо важливість кожному критерію.

Критерій № 1. Швидкість запропонованого судна. В нашому досліджені даний критерій є основним, оскільки від швидкості судна прямо залежить час на доставку вантажу, який, виходячи з результатів дослідження [3], є ключовим обмеженням в процесі перевезення продовольчих вантажів (ПВ). Оскільки основним завданням цієї роботи є встановлення максимально допустимої відстані перевезення, чим вище є швидкість судна, тим більшу відстань воно зможе подолати за обмежений час. Критерій прагне до максимальних значень.

Критерій № 2. Розміри судна. Як було зазначено вище, фідерні судна-контейнеровози призначені для зв›язку малих і середніх портів в рамках певного регіону з портом-хабом, а також для

доставки певних категорій вантажів в рамках конкретного бассейну. Тому важливо, щоб обраний тип судна мав можливість заходити в максимальну кількість таких портів. Особливо важливим в даному випадку є осадка судна, яка найчастіше є головним обмежувальним фактором. Згідно з даними [9], більшість світових портів допускають осадку судна в межах від 8 м до 14 м та мають довжину причалів від 100 до 200 м. Отже, чим менше у судна осадка і довжина, тим в більшу кількість портів воно зможе обслуговувати. Критерій тяжіє до мінімальних значень.

Критерій № 3. Контейнеромісткість судна. Даний критерій має оцінювати, яку кількість ІТО в TEU може одночасно перевозити вказані типи суден. Даний критерій є балансуючим та дозволяє частково оцінити економічну ефективність судна, адже чим більше судно може вмістити в себе вантажу, тим більше воно заробляє коштів за рейс. Критерій 3 як і критерій 1, прагне до максимальних значень показника.

Визначившись з критеріями оцінки за даними [10] оберемо 4 різних типи суден-контейнеровозів. Вибір будемо проводити серед суден класів «Feeder», «Feeder Max» та «Handy». З кожного з цих типів оберемо 1–2 типи судна. Далі, використовуючи дані з [11–12] знайдемо необхідні нам параметри і характеристики кожного типу судна та оцінимо його за вищеописаними критеріями. Розміри судна зазначені в таблиці 1.

Тепер, за допомогою методу аналізу ієрархії [13] можна обрати тип судна. Для початку створимо матрицю попарних порівнянь критеріїв. Матриці попарних порівнянь заповнюються парами елементів, симетричних відносно головної діагоналі, що відображають кожне твердження експерта. Оскільки об'єкт є рівноважливим сам до себе, то на головній діагоналі такої матриці вказується 1. Значення елементів обираємо відповідно до шкали відносної важливості MAI [13]. Матриця критеріїв зображена в таблиці 2.

Аналогічним чином, на основі даних з таблиці 1, створюємо матрицю попарних порівнянь альтернатив для кожного типу судна за критеріями з таблиці 2. Загальна матриця альтернатив зображена у таблиці 3.

Розраховуємо локальні вектори пріоритетів, індекс узгодженості та відношення узгодженості для матриці попарних порівнянь критеріїв (таблиця 2) та матриць попарних порівнянь альтернатив за критеріями (таблиця 3). Локальні пріоритети отримуються шляхом обчислення середнього геометричного рядків матриці попарних порівнянь матриці А, з наступною нормалізацією всіх складових вектора:

$$X_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} a_{ij}}}{\sum_{i=1}^{n} \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} a_{ij}}} \qquad (1)$$

де a_{ij} – значення локального пріоритету чи попарної альтернативи за критеріями.

Для оцінки однорідності тверджень використовують відхилення величини максимального власного значення від порядку матриці. Якщо порядок матриці n збігається з максимальним власним числом λmax, то судження узгодженні. Для встановлення непослідовності тверджень

Таблиця 1

Розміри і основні характеристики морських суден

Тип судна	Місткість, TEU	Дедвейт, мт	Довжина, м	Ширина, м	Осадка, м	Швидкість, вузли
Damen Feeder 900	888	9800	150	21,8	7,2	17
Vantage	365	3650	99	15,9	4,9	14,5
Mirror	803	10500	140	21,8	7,3	18,5
Unisky	1005	10600	154	21	7,0	18

Таблиця 2

Матриця попарних порівнянь критеріїв

	Швидкість судна	Розміри (осадка)	Місткість, TEU
Швидкість судна	1	2	4
Розміри (осадка)	0,5	1	3
Місткість, TEU	0,25	0,333333333	1

використовують індекс узгодженості та відношення узгодженості. Індекс узгодженості визначається наступним чином:

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^{n}\left(X_j * \sum_{i=1}^{n} a_{ij} \right) \quad (2)$$

$$I_y = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (3)$$

Відношення узгодженості I_o визначають наступним чином:

$$I_o = \frac{I_y}{M\left(I_y\right)} \quad (4)$$

Використавши формулу (1) розрахуємо вектори пріоритетів критеріїв, отриманий в результаті розрахунку головного власного вектора з наступною його нормалізацією. Аналогічно розраховуємо локальні пріоритети для типів суден за кожним з критеріїв. Результати розрахунків зображено у таблицях 4 і 5.

Скориставшись формулами (2–4) розраховуємо індекс узгодженості та відношення однорідності

$$\lambda_{max} = 2{,}052$$

$$I_y = \frac{2{,}052 - 3}{2} = -0{,}47$$

$$I_o = \frac{-0{,}47}{0{,}58} = -0{,}81$$

Отримане значення відношення узгодженості хоч і є зависоким, але будемо вважати його прийнятним. Отже, найважливішим, а отже вирішальним показником є швидкість судна. Далі розраховуємо глобальні пріоритети. Ця процедура зводиться до формування матриці локальних пріоритетів альтернатив за критеріями $X_1^{(1)}$ з подальшим її множенням на вектор пріоритетів критеріїв.

$$X_1^{(1)} = \left[0{,}83; 0{,}16; 0{,}009\right]^T$$

де Т – транспонована матриця.

Таблиця 3

Матриця попарних порівнянь альтернатив за критеріями

Швидкість судна	**Damen Feeder 900**	**Vantage**	**Mirror**	**Unisky**
Damen Feeder 900	1	3	0,5	0,5
Vantage	0,333333333	1	0,25	0,25
Mirror	2	4	1	1
Unisky	2	4	1	1
Розміри (осадка)	Damen Feeder 900	Vantage	Mirror	Unisky
Damen Feeder 900	1	0,333333333	1	0,5
Vantage	3	1	3	3
Mirror	1	0,333333333	1	0,5
Unisky	2	0,333333333	2	1
Місткість, TEU	Damen Feeder 900	Vantage	Mirror	Unisky
Damen Feeder 900	1	4	2	0,5
Vantage	0,25	1	0,333333333	0,2
Mirror	0,5	3	1	0,5
Unisky	2	5	2	1

Таблиця 4

Розрахунок вектора локальних пріоритетів матриці критеріїв

	Швидкість судна	**Розміри (осадка)**	**Місткість, TEU**	**Вектор пріоритетів**
Швидкість судна	1	2	4	0,83
Розміри (осадка)	0,5	1	3	0,16
Місткість, TEU	0,25	0,333	1	0,009

$$P_1^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,045 & 0,006 & 0,161 \\ 0,001 & 0,942 & 0,0006 \\ 0,477 & 0,006 & 0,030 \\ 0,477 & 0,046 & 0,807 \end{bmatrix}$$

$$P = X_1^{(1)} * P_1^{(1)} \quad (5)$$

$$P = \max\begin{bmatrix} 0,039 & 0,148 & 0,399 & 0,412 \end{bmatrix} = 0,412$$

За результатами проведеного MAI аналізу визначено, що найбільш вдалим є судно типу Unisky. Тому для подальших розрахунків в даній роботі будемо спиратися саме на характеристики цього типу судна.

Визначення відстані перевезення у переобладнаній ІТО. Обравши тип судна перейдемо до основного завдання даної роботи, а саме до визначення допустимої відстані перевезення вантажів у запропонованих в [3] ІТО. Під час визначення відстані будемо керуватися наступними умовами:

– Температура зовнішнього середовища дорівнює +50 град. Цельсію

– Температура перевезення вантажу (заморожене м'ясо яловичини) складає –20 град. Цельсію;

– Перевезення проводиться у 20-фут контейнері на палетах розміром 1200х1200 мм.

Важливо врахувати, що запропоновані ІТО буде використовуватись в інтермодальних перевезеннях, що розглядають комплексну доставку не тільки морським, а різними видами наземного транспорту (автомобілі, залізниця) від дверей до дверей, а отже розраховані часові обмеження роботи стосуються всього процесу доставки ПВ від місця виробництва чи зберігання до пункту призначення. Це робить розрахунок відстані достатньо індивідуальним процесом через необхідність врахування місць виробництва харчової продукції, їх наближеності до порту, локації складів отримувача продукції. Тому в нашому дослідженні сконцентруємось на розрахунку саме морської частини перевезення від порту до порту. При цьому, спираючись на формулювання поняття інтермодальних перевезень, час для розрахунку будемо визначати виходячи з наступної пропорції, де:

– До 30% від загального часу перевезення буде відведено наземній доставці (15% з складу відправника до порту відправлення і стільки ж з порту призначення до складу отримувача);

– 10% – час на митно-портову обробку ІТО, очікування на судно чи наземний транспорт, погрузку та вигрузку в порту відправлення і призначення.

Таблиця 5

Розраховані значення локальних пріоритетів для альтернатив за кожним критерієм

Швидкість судна	**Damen Feeder 900**	**Vantage**	**Mirror**	**Unisky**	**Вектор пріоритетів**
Damen Feeder 900	1	3	0,5	0,5	0,045
Vantage	0,333	1	0,25	0,25	0,001
Mirror	2	4	1	1	0,477
Unisky	2	4	1	1	0,477
			I_y= –0,37	I_o= –0,42	
Розміри (осадка)	Damen Feeder 900	Vantage	Mirror	Unisky	
Damen Feeder 900	1	0,333	1	0,5	0,006
Vantage	3	1	3	3	0,942
Mirror	1	0,333	1	0,5	0,006
Unisky	2	0,333	2	1	0,046
			I_y= –0,60	I_o= –0,67	
Місткість, TEU	Damen Feeder 900	Vantage	Mirror	Unisky	
Damen Feeder 900	1	4	2	0,5	0,161
Vantage	0,25	1	0,333	0,2	0,0006
Mirror	0,5	3	1	0,5	0,030
Unisky	2	5	2	1	0,807
			I_y= –0,48	I_o= –0,54	

Таким чином розрахунок відстані буде проводитися за наступною формулою:

$$S_{voy} = V_{vessel} * \left(0,6 * T_{voy}\right) \quad (6)$$

де V_{vessel} – швидкість обраного типу судна, вузл. T_{voy} – максимально допустимий час рейсу, що розраховується за методикою з [3] і дорівнює 7,87 діб при вказаних вище температурних обмеженнях.

$$S_{voy} = 18 * \left(0,6 * 7,87 * 24\right) = 2039 \text{ миль}$$

Отже, допустима відстань морської частини перевезення при обмеженому запасі холодоагенту в заданих вище умовах становить 2039 морських миль. На рисунках 1 і 2 надано приклад оптимальних орієнтирів по відстані, для яких зазначене обмеження виконується.

Висновки. В даному досліджені було виконано наступні завдання:

– Надано визначення поняттю фідерного сервісу і його переваг при використанні ІТО з рідким охолодженням.

– За допомогою MAI методу обрано тип судна.

– Розраховано допустиму відстань перевезення вантажу.

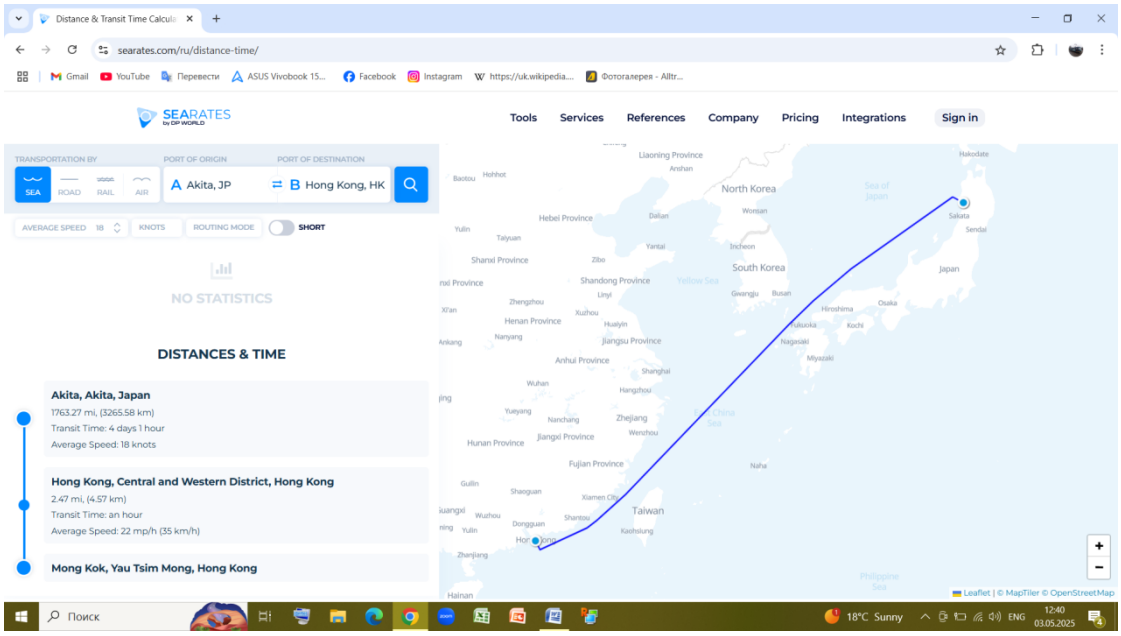


Рис. 1. Приклад допустимої відстані рейсу для в Азійсько-тихоокеанському регіоні [14]

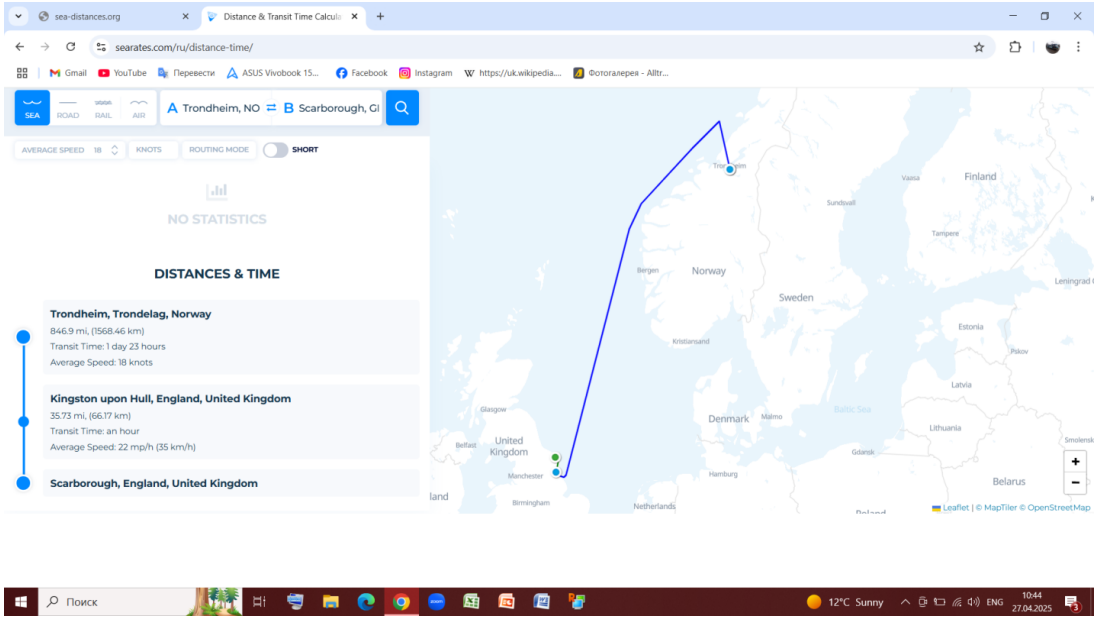


Рис. 2. Приклад допустимої відстані рейсу в Західноєвропейському регіоні [14]

Список літератури:

1. 30th edition of Lloyd's Maritime Atlas. *Taylor & Francis Group*. P. 11.
2. Давидов В., Доронін В., Любарець І. Особливості управління та навігації великогабаритних контейнеровозів при їх експлуатації у складних навігаційних та гідрометеорологічних умовах. *Водний транспорт*. 2022. вип. 2 : Судноводіння та енергетика суден. С. 1–2. URL: https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/228.
3. Слинько О., Столянов В. Технологія тичасового переобладнання та використання класичного контейнера в рефрижераторний шляхом встановлення термовкладишу та кріогазифікатора з зрідженими кріогенними речовинами. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. вип. 211. С. 256–275. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_211-1.pdf.
4. Подмазко О., Піщанська Н. Суднова холодильна техніка / ред. В. Мілованов. Одеса : Одеська національна академія харчових технологій, 2020. 1–59 с.
5. Кунда Н. Особливості функціонування систем перевезень вантажів за участю морського транспорту. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки»*. 2022. вип. 18. С. 191–201.
6. Дрожжин О. Організація роботи суден-контейнеровозів на фідерних лініях : дис. … канд. техн. наук : 05.22.01 / Одеський національний морський університет. Одеса, 2019. 156 с. URL: https://onmu.org.ua/spec_rada/Drozhin/Drozhin_dis.pdf.
7. Andersen M. W. Service Network Design and Management in Linear Container Shipping Applications / ред.: O. B. G. Madsen, T. R. Stidsen. Kongens Lyngby : DTU Transport, 2010. 199 p. ISBN 978-87-7327-210-7.
8. Foschi A. D. The maritime container transport structure in Mediterranean and Italy. University Pisa. 2003. T. 24.
9. Concept Design of a Fast Sail Assisted Feeder Container Ship / A. Burden and other; ред. G. E. Hearn. University of Southhampton : school of Engineering Sciences, 2010. 3–15 p. https://surl.li/dvuduu
10. Container ship sampling. *Clarkson Research, The Containership Register*. 22.12.2011. URL: https://surli.cc/phzrws
11. Container-feeder-900. *Damen website*. 01.04.2025. URL: https://www.damen.com/vessels/cargo/container-feeders/container-feeder-900 (дата звернення: 29.04.2025).
12. UNISKY, Container ship. *Balticshipping*. URL: https://www.balticshipping.com/vessel/imo/9353747 (дата звернення: 29.04.2025).
13. Реалізація методу аналізу ієрархій при прийнятті рішень / Ю. О. Щипський та ін. *Вінницький національний технічний університет*. 2020. С. 1–6.
14. Distance-time. *Searates by DP World*. URL: https://www.searates.com/ru/distance-time/ (дата звернення: 03.05.2025).

Stolianov V.A. METHOD OF DETERMINING THE SERVICE REGION REGIME CARGOES IN UNIVERSAL CONTAINERS WITH THERMAL LINERS AND CRYOGASIFIERS

In this science material was carried out to calculate and determine the maximum permissible distances for the transportation of refrigerated cargo in classical containers that were temporarily converted into refrigerated containers by installing a thermal liner, liquefied cryogenic cylinders and a system for maintaining the required temperature.

In the process of fulfilling the research objective, various scientific sources were analysed regarding the operation of cryogenic cooling systems, their characteristics and the efficiency of using the cooled liquid in conditions of high ambient temperatures and limited refrigerant.

The article also considers various transport and technological systems (*TTS*) *for the delivery of foodstuffs in the type of intermodal transport unit* (*ITU*) *proposed earlier. Of these, the feeder TTS stands out as the most successful, as it ensures efficient and reliable operation of container ships* (*which are an integral part of any TTS in intermodal communication*) *over short and medium distances. After selecting the required TTS, the most suitable container ship model was selected using the analytical hierarchy method. The choice was made based on three criteria for four types of container ships among the Feeder, Feeder Max and Handy classes. All the proposed criteria assessed the efficiency of each type of vessel to operate in the feeder service with the minimum delivery time of the PV.*

Having selected the best type of vessel based on its technical and operational characteristics and a previous study on the time limits of the cryogenic unit, the permissible distance of sea transportation was

calculated using frozen meat in a 20-foot converted container as an example. The calculations showed that at a temperature of about +50 deg. Celsius on average, the cargo can cover a distance of about 2,000 nautical miles without additional refuelling operations, which corresponds to transport in such sea basins as the Baltic, North and Mediterranean and Black Seas, the East Atlantic coast in Europe or the East and South China and Japan Seas in Asia.

Key words: *transport and technological system, maritime transport, container ship, container, transport distance, voyage time, intermodal transport, container transport, liner shipping, regulated cargo, refrigerated cargo, intermodal transport unit.*

УДК 629.1.04:621.316.351
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/50

Тараненко С.В.
Національний транспортний університет

Кириченко О.С.
Національний транспортний університет

Чередник В.М.
Національний транспортний університет

Колесник В.В.
Національний транспортний університет

Пріступа С.В.
Національний транспортний університет

Пастух О.В.
Національний транспортний університет

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ІЗОЛЯТОРІВ І СТРУМОПРОВІДНИХ ШИН СУДНОВОГО ГРЩ В РЕЖИМІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

В роботі проведена оцінка електродинамічної стійкості композитних ізоляторів SM76 і мідних струмопровідних шин прямокутного та квадратного поперечного перерізу в судновому головному розподільчому щиті (ГРЩ) з урахуванням їх монтажного положення в режимі трифазного короткого замикання. Аналіз проводився для трифазної конструкції головного розподільчого щита з конфігурацією: одна струмопровідна шина на фазу, що є типовим рішенням для суднових електроенергетичних систем середньої потужності. Струмопровідні шини трьох фаз розташовані в один ряд по горизонтальні для простоти монтажу та менших вимог до простору в суднових умовах. Розглядаються суднові електромережі з мідними шинами, що, на відміну від берегових, мають вищі вимоги до провідності та стійкості до корозії. Наведено основні математичні рівняння, що можуть бути використані при описі електричних і механічних процесів у струмопровідних шинах при трифазному короткому замиканні.

При трифазному короткому замиканні за умов однорядного розміщення шин фаз А, В, С виникають електродинамічні сили, напрямок яких визначається розташуванням шин і миттєвими напрямками струмів. Через фазовий зсув 120° у різні моменти часу шини можуть притягуватися або відштовхуватись. Притягання виникає при однакових напрямках струмів (електродинамічне зближення), відштовхування – при протилежних. У перші мілісекунди після короткого замикання діє ударний струм іуд, який характеризується максимальною амплітудою та створює найбільше електродинамічне навантаження. Саме в цей момент електродинамічні сили можуть досягати критичних значень, що потенційно загрожує пошкодженням шин або їхніх кріплень.

Розрахунок електродинамічної стійкості струмопровідних шин передбачав визначення моменту інерції і моменту опору поперечного перерізу, частоти власних коливань, максимального напруження в шинах, максимального навантаження на ізолятори. Для реалізації розрахунку було розроблено його алгоритм, побудовано відповідну блок-схему та створено програму з використанням одного з найпоширеніших інструментів технічного програмування – Python. Розглянуто чотири приклади застосування розрахункового алгоритму для мідних струмопровідних шин прямокутного 100×10 мм і квадратного 30×30 мм перерізу при довжині прольоту між ізоляторами – 1 м і ударному струмі – 40 кА з різними відстанями між центрами шин і врахуванням типу монтажу для прямокутних шин.

Ключові слова: *електродинамічна стійкість, ізолятори, струмопровідні шини, трифазне коротке замикання, судновий ГРЩ.*

Постановка проблеми. У режимах коротких замикань в ізоляторах і струмопровідних шинах суднового головного розподільчого щита (ГРЩ) утворюються значні електродинамічні навантаження, що можуть призвести до деформації або руйнування. При цьому існуючі нормативні методики не завжди дозволяють належним чином врахувати вплив просторового положення та тип монтажу шин на напружено-деформований стан конструкції. Розгляд критеріїв оцінювання надійності та безпеки в аварійних режимах для суднових ГРЩ ускладнюється, враховуючи обмежений простір, властивий водному транспорту. В зв'язку з цим важливим є аналіз електродинамічної стійкості ізоляторів і струмопровідних шин прямокутного перерізу з урахуванням їх монтажного положення та конструктивного кріплення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом активно досліджуються питання роботи суднових електроустановок в аварійних режимах, наприклад у разі коротких замикань, що можуть спричинити руйнування ізоляції, перегрів, займання, збій в роботі як берегового, так і суднового електрообладнання. Питання оцінки електродинамічної стійкості суднових шинопроводів тісно пов'язані з математичним описом процесів перебігу короткого замикання [1–3] в системах електропостачання [4]. Вимоги до конструктивного виконання суднових систем, зокрема до елементів електропостачання та їх стійкості до дії аварійних режимів розглянуто в [5]. Правила улаштування електроустановок [6] є основним нормативним документом, що регламентує вимоги до безпечної та надійної експлуатації електроустановок, у тому числі в умовах коротких замикань. ДСТУ EN 61534-1:2019 [7] встановлює загальні технічні вимоги до систем шинопроводів, що мають особливе значення в забезпеченні надійності електропостачання у складних технічних умовах, зокрема в морському середовищі. ДСТУ IEC 60909-4:2008 [8] містить методики та приклади розрахунку струмів короткого замикання в трифазних системах, що є критично важливими для аналізу аварійних режимів у суднових електроенергетичних системах.

Проведений аналіз публікацій, нормативних документів і стандартів показує, що питання електродинамічних процесів в ізоляторах і струмопровідних шинах при коротких замиканнях у судновому ГРЩ розкрито не в повній мірі, зокрема щодо програмної реалізації в сучасних середовищах програмування для створення автоматизованих розрахунків електродинамічної стійкості.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз електродинамічної стійкості композитних ізоляторів і струмопровідних шин прямокутного та квадратного поперечного перерізу в судновому ГРЩ з урахуванням їх монтажного положення в режимі трифазного короткого замикання, а також розробка алгоритму розрахункового моделювання та його програмна реалізація.

Виклад основного матеріалу. Аналіз процесів у сучасних опорних композитних ізоляторах і струмопровідних шинах суднового ГРЩ у режимі трифазного короткого замикання [1–4] повинен враховувати: електричні процеси в шинах за *RL*-моделлю; електродинамічні сили; деформаційну реакцію шин як гнучкої механічної системи; оцінку міцності ізоляторів на електродинамічне навантаження. Система диференціально-алгебраїчних рівнянь з обмежувальною умовою міцності, що описує ці процеси, має наступний вигляд:

$$\begin{cases} L\dfrac{dI_k(t)}{dt} + RI_k = U_k(t), k = A, B, C; \\ F_{ij}(t) = \dfrac{\mu_0}{2\pi}\dfrac{I_i(t)I_j(t)}{d_{ij}}l, i \neq j; \\ \rho A\dfrac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + EJ\dfrac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} = f(x,t); \\ \dfrac{F(t)}{2} \leq \sigma_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (1)$$

У дослідженні розглядаються два варіанти монтажного положення шин прямокутного перерізу: вертикальне («реброве положення») та горизонтальне («площинне положення»). Усі струмопровідні шини розташовані в одній площині з однаковою міжфазною відстанню. Фрагмент суднового ГРЩ з композитними ізоляторами SM76 (поліамід) і мідними шинами прямокутного перерізу при розташуванні у ребровому (а) та площинному (б) положенні показано на рис. 1.

Струм у фазах при короткому замиканні визначається виразом:

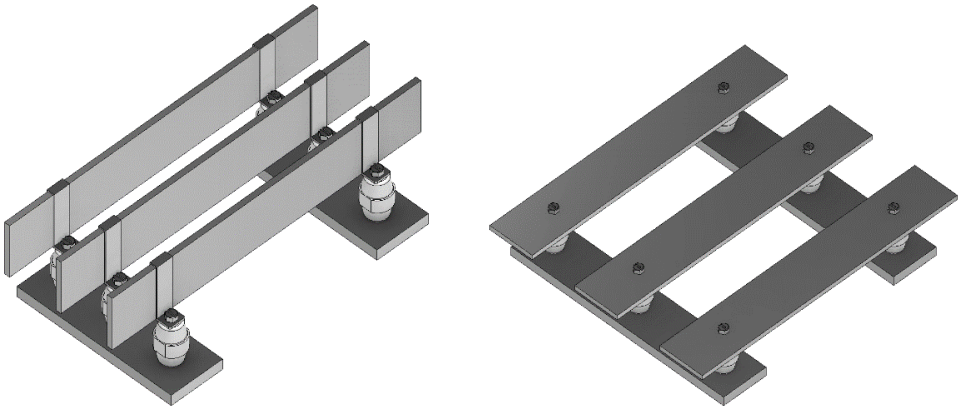
$$L\frac{dI_k(t)}{dt} + RI_k = U_k(t), k = A, B, C, \quad (2)$$

де I_k – струм у фазі k, А;

L – індуктивність шини, Гн;

R – активний опір, Ом;

$U_k(t)$ – напруга в момент короткого замикання, В.



а *б*

Рис. 1. Ділянка трифазного шинопроводу суднового ГРЩ з композитними ізоляторами SM76 та мідними струмопровідними шинами прямокутного перерізу при розташуванні у вертикальному ребровому (а) та горизонтальному площинному (б) положенні

У реальності напруга під час короткого замикання не миттєво падає до нуля, оскільки формується перехідний процес з дуговим розрядом, де можуть бути короткочасні перенапруги, але в сталому режимі короткого замикання напруга в точці замикання зменшується до нульового значення. Перше рівняння системи (1) визначає, який струму протікає через шини, оскільки саме він формує електродинамічну силу, що спричиняє деформацію.

Електродинамічна сила $F_{ij}(t)$ між струмопровідними шинами фаз *i* та *j* розраховується за допомогою алгебраїчного рівняння, яке визначає миттєву силу взаємодії між паралельними шинами, по яких протікають струму:

$$F_{ij}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_i(t) I_j(t)}{d_{ij}} l, i \neq j, \qquad (3)$$

де $I_i(t), I_j(t)$ – струми в шинах, А;

d_{ij} – відстань між шинами, м;

l – довжина прольоту між ізоляторами (відстань між опорами), м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна стала, Гн/м.

Сума всіх $F_{ij}(t)$ дає результуючу силу $F(t)$, яка потім використовується в третьому рівнянні системи для механічної деформації струмопровідних шин.

Класичне рівняння Ейлера-Бернуллі для прогину балки, що враховує як інерційні ефекти, так і жорсткість прольоту:

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} = f(x,t), \qquad (4)$$

де $\rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$ – перший доданок для інерційної складової (закон Ньютона для розподіленої маси балки);

$EJ \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4}$ – другий доданок, що описує опір деформації, який визначає жорсткість балки (реакція на викривлення);

ρ – густина матеріалу, кг/м^3 (для міді $\rho_{Cu} \approx 8960$ кг/м^3);

$A = b \cdot h$ – площа поперечного перерізу шини, м^2;

b, h – відповідно ширина та висота шини, м;

$u(x,t)$ – прогин шини у вертикальному напрямку в точці з координатою *x* у момент часу *t*;

E – модуль Юнга, Па (для міді $E_{Cu} \approx 1{,}1 \cdot 10^{11}$ Па);

$J = \frac{bh^3}{12}$ – момент інерції прямокутного поперечного перерізу шини, м^4;

$f(x,t)$ – розподілене зовнішнє навантаження на шину, Н/м, наприклад, імпульсна електродинамічна сила при короткому замиканні.

Виділяються дві стадії руху струмопровідних шин: вимушене – під впливом електродинамічних зусиль та вільне – після відключення короткого замикання. Диференціальне рівняння руху пружної балки моделює прогин шини під дією сили $f(x,t)$. Воно дозволяє моделювати як примусові $(f(x,t) \neq 0)$, так і вільні коливання $(f(x,t) = 0)$ після дії імпульсу.

Умова міцності для ізолятора (кріплення шини):

$$\frac{F(t)}{2} \leq \sigma_{доп}, \qquad (5)$$

$F(t)$ – сила, що діє на шину від короткого замикання, Н;

2 – число для двох ізоляторів (по обидва боки прольоту);

$\sigma_{доп}$ – допустиме напруження для матеріалу ізолятора, Па.

Умова (5) призначена для перевірки, чи витримує ізолятор навантаження, яке передає шина. Вона розглядається як статичне навантаження, що діє через дві опори. Якщо нерівність виконується, то конструкція вважається електромеханічно стійкою.

Для автоматизації розрахунку електродинамічної стійкості шин при короткому замиканні розроблено програму на Python – одній із провідних мов програмування за рейтингом TIOBE [9]. Алгоритм програми для оцінки електродинамічної стійкості ізоляторів і мідних струмопровідних шин суднового ГРЩ наступний:

1. Вибір поперечного перерізу шини:

– прямокутний (1) – окремо враховується монтажне положення;

– квадратний (2) – монтажне положення не має значення через симетрію.

2. Введення геометричних параметрів.

Для прямокутного перерізу:

– горизонтальне площинне (1): шина лежить плазом – ширина шини b (мм → м); висота шини h (мм → м);

– вертикальне реброве (2): шина встановлена на ребро – висота шини h (мм → м); товщина шини b (мм → м).

Для квадратного перерізу: $b = h = H$ – сторона квадрата (мм → м).

3. Введення додаткових параметрів: довжина прольоту l (м); відстань d між центрами шин (м) з перевіркою $d>b$, інакше помилка та повернення до п. 1; ударний струм короткого замикання $i_{уд}$ (кА → А); конструктивні коефіцієнти форми $К_ф$ та розташування $К_{розт}$; коефіцієнт динамічного навантаження η.

4. Обчислення геометричних характеристик поперечного перерізу шини.

Момент інерції J (м^4) і момент опору W (м^3):

– для прямокутного перерізу при горизонтальному площинному монтажі:

$$J_x = \frac{bh^3}{12}; \quad W_x = \frac{I}{h/2} = \frac{bh^2}{6};$$

– для прямокутного перерізу при вертикальному ребровому монтажі:

$$J_y = \frac{hb^3}{12}; \quad W_y = \frac{I}{b/2} = \frac{hb^2}{6};$$

– для квадратного перерізу:

$$J_{xy} = \frac{H^4}{12}; \quad W_{xy} = \frac{H^3}{6}.$$

5. Розрахунок площі поперечного перерізу $A=b\cdot h$ (мм^2).

6. Розрахунок маси шини при густині міді $\rho_{Cu} = 8960$ кг/м^3:

$$m = \rho_{Cu}\cdot V = \rho_{Cu}\cdot A\cdot l = \rho_{Cu}\cdot b\cdot h\cdot l \text{ (кг)}.$$

7. Розрахунок першої частоти власних коливань:

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m}} = \frac{r_1^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJ}{\rho A l}} = \frac{r_1^2}{2\pi l}\sqrt{\frac{EJ}{\rho A}},$$

де $r_1 = 4{,}73$ – розрахунковий коефіцієнт шинних конструкцій.

8. Розрахунок максимальної динамічної сили $F_{max}^{\langle 3\rangle}$ на ізолятор:

$$F_{max}^{\langle 3\rangle} = \frac{\sqrt{3}\cdot 10^{-7}}{a} l \left(i_{уд}^{\langle 3\rangle}\right)^2 K_ф K_{розт},$$

де $К_ф$ – коефіцієнт форми, що визначається за результатами аналізу довідкових діаграм функціональної залежності $K_ф = f\left(\frac{a-b}{b+h}; \frac{b}{h}\right)$;

$К_{розт}$ – коефіцієнт взаємного розташування шин, який при розташуванні шин в одній площині $К_{розт} = 1$.

9. Розрахунок максимального динамічного напруження в матеріалі шин:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}^{\langle 3\rangle} l}{\lambda W}\eta,$$

де λ – коефіцієнт розрахунку міцності шинних конструкцій (для багатопрольотних конструкцій: λ = 10 – для крайніх прольотів; λ = 12 – для середніх прольотів);

η = 1,0 – 2,0 – динамічний коефіцієнт, що враховує додаткові динамічні сили при короткому замиканні.

10. Виведення результатів: момент інерції J (м^4); момент опору W (м^3); площа А (м^2); маса m (кг); перша частота власних коливань f_1 (Гц); максимальна сила на ізолятор F_{max} (кН); максимальне напруження в матеріалі шин σ_{max} (МПа).

11. Запит про повторення розрахунку: якщо «так» (1), то повернення до п. 1, якщо «ні» (2) то завершення програми.

Фрагмент програмного коду (рис. 2) і блок-схему (рис. 3) розрахункової програми,

```
# Визначення розмірів шини
if section == "Прямокутний":
    if mount == "Плашмя":
        b, h = B/1000, H/1000
    elif mount == "На ребро":
        h, b = B/1000, H/1000
elif section == "Квадратний":
    b = h = H/1000
# Геометричні характеристики
A = b*h
J = (b*h**3)/12
W = (b*h**2)/6
# Фізичні параметри
rho = 8960
m = rho*A*l
E = 1.1e11
r1 = 4.73
f1 = (r1**2/(2*π*l**2))*sqrt(E*J/m)
# Максимальне навантаження та напруження
Fmax = (sqrt(3)*1e-7/d)*l*iуд**2*Кф*Крозт/1000
lam = 12
sigma_max = (Fmax*1000*l)/(lam*W)*η/1e6
```

Рис. 2. Фрагмент коду розрахунку електродинамічної стійкості ізоляторів і шин

реалізованої в Python, створено на основі наведеного вище алгоритму.

Суднова електроенергетична система є ізольованою автономною мережею з обмеженим джерелом живлення (переважно дизель-генератором), що зумовлює меншу величину струму короткого замикання порівняно з береговими промисловими установками. Це вимагає миттєвої роботи захисту, щоб уникнути порушення функціонування судна. Типовий час спрацьовування захисту при трифазному короткому замиканні становить 0,05–0,2 с без витримки часу і 0,1–0,5 с із короткою витримкою. Для розрахунку нагріву шин [10, 11] у судновому ГРЩ зазвичай приймають інтервал 0,1–0,2 с, що дозволяє врахувати тепловий імпульс до вимкнення аварії. Температура нагріву Θ струмопровідної шини з початковою температурою $\Theta_0 = 20$ °C через підвищення температури $\Delta\Theta$ внаслідок дії струму короткого

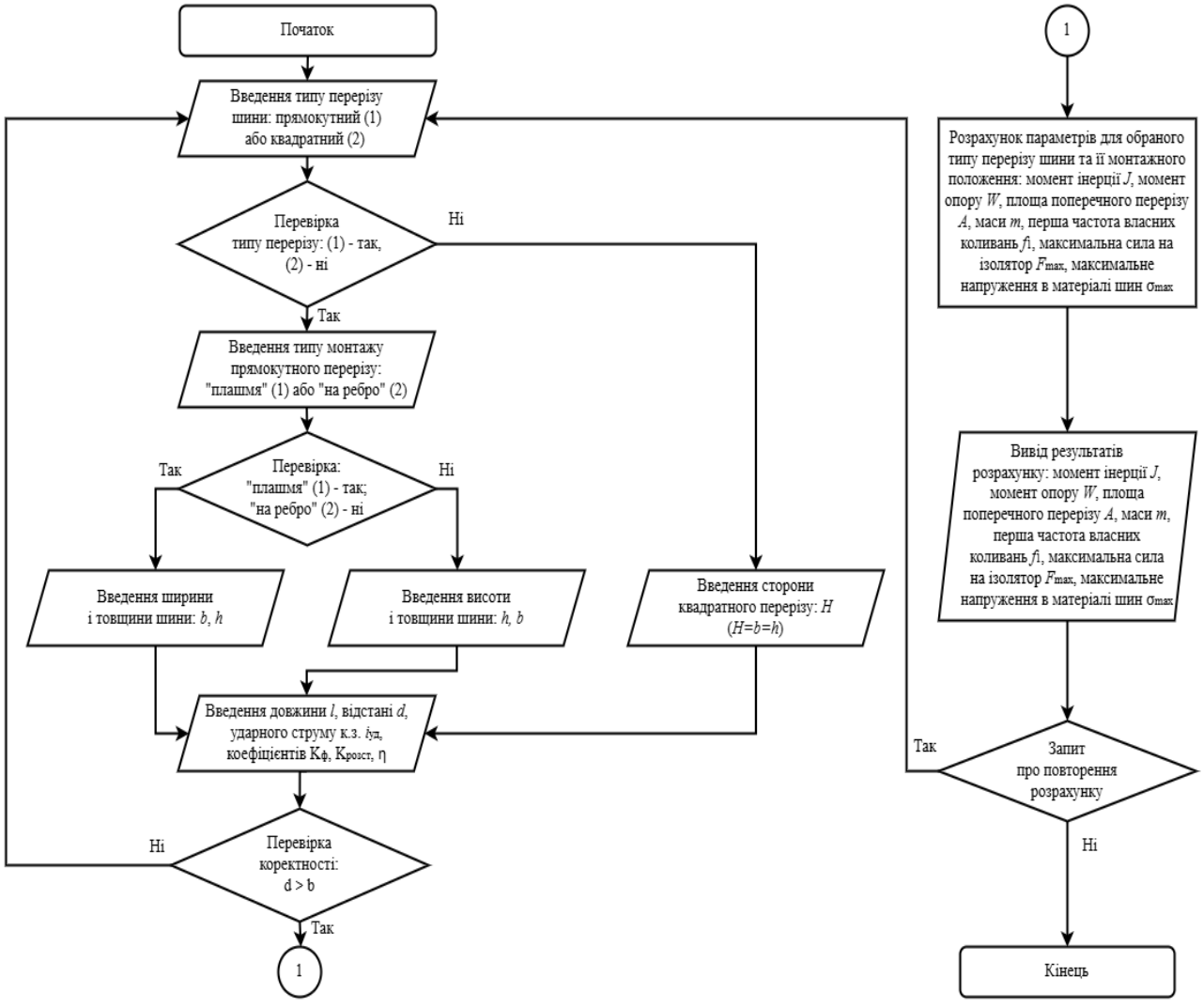


Рис. 3. Блок-схема алгоритму програми

замикання для мідної шини прямокутного перерізу 100×10 мм при площі поперечного перерізу $A = b \cdot h = 100 \cdot 10 = 1000$ мм^2 та питомій теплоємності $\gamma_{Cu} = 0{,}132$ А^2·с/(мм^4·°С) при струмі $i_{уд}^{\langle 3 \rangle} = 10$ кА за час дії $t = 0{,}2$ с обчислюється за виразом:

$$\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta = \frac{\left(i_{уд}^{\langle 3 \rangle}\right)^2 t}{A^2 \gamma_{Cu}} = 20 + \frac{10000^2 \cdot 0{,}2}{1000^2 \cdot 0{,}132} \approx 171{,}5\,^{\circ}\text{C}.$$

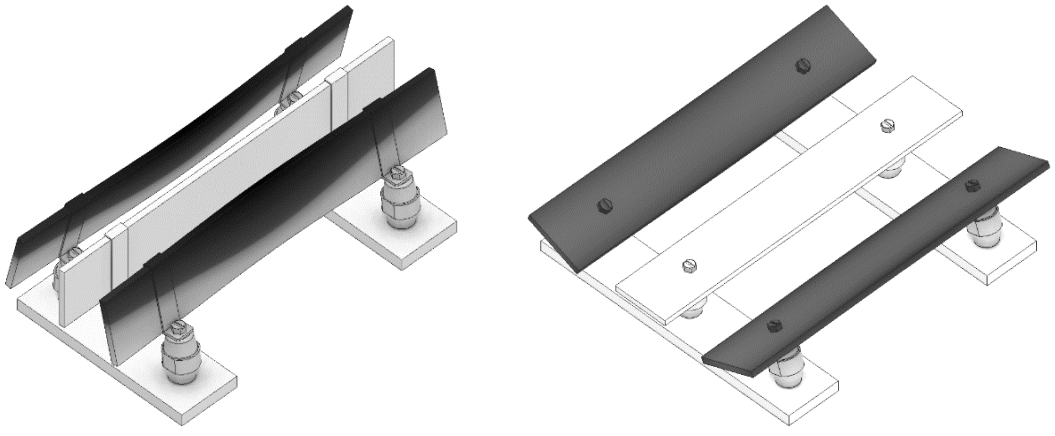
Отримане значення температурного підвищення $\Delta\Theta$ при струмі $i_{уд}^{\langle 3 \rangle} = 10$ кА є прийнятним для короткочасного режиму, оскільки максимально допустима тимчасова температура при короткому замиканні для міді $\Theta_{Cu.т.д.} = 250$–300 °С.

Прогнозовану деформацію поліамідних ізоляторів SM76 з латунними вставками та мідних струмопровідних шин 100×10 мм у ребровому (а) та площинному (б) положенні під дією електродинамічних сил, що виникають при трифазному короткому замиканні зображено на рис. 4. Темним зонам відповідають найбільшим значенням деформацій, сірим та світлим – відповідно середні та найменші значення.

На рис. 5 проілюстровано чотири варіанти розрахунку електродинамічної стійкості ізоляторів і мідних струмопровідних шин 100×10 мм судного ГРЩ з довжиною прольоту $l = 1$ м при значно більшому ударному струмі $i_{уд}^{\langle 3 \rangle} = 40$ кА: прямокутний переріз з горизонтальним площинним положенням при d=0,2 м (рис. 5, а); прямокутний переріз з вертикальним ребровим положенням при $d = 0{,}1$ м (рис. 5, б); квадратний переріз зі стороною $H = 30$ мм при міжфазних відстанях $d = 0{,}1$ і $d = 0{,}2$ м (рис. 5, в-г).

Для чотирьох наведених розрахунків умови електродинамічної міцності виконуються. Для композитних ізоляторів SM76 максимальна сила F_{max} на ізолятор не перевищує механічної руйнівної сили на вигин – 30 кН [12], а для мідних шин, виготовлених з електротехнічної міді, максимальне напруження σ_{max} не перевищує допустимих в стандарті [13] значень: межа плинності для м'якої міді (R220) – не менше 70 МПа, для твердої міді (R290) – не менше 190 МПа.

Висновки. У статті проведено аналіз електродинамічної стійкості композитних ізоляторів SM76 (поліамід) і мідних струмопровідних шин (прямокутного 100×10 мм і квадратного 30×30 мм поперечного перерізу) для суднового ГРЩ в режимі трифазного короткого замикання. Наведено математичні залежності, що дозволяють оцінювати максимальні сили, що діють на ізолятори, і максимальні напруження в матеріалі шин. Розроблено алгоритм і блок-схему розрахункового моделювання, а також виконано програмну реалізацію в середовищі Python. Для підтвердження ефективності запропонованого підходу при ударному струмі $i_{уд}^{\langle 3 \rangle} = 40$ кА виконано чотири приклади розрахунків для різних варіантів конструкцій та монтажного положення шин.



а *б*

Рис. 4. Прогнозована деформація ізоляторів SM76 з композиційною конструкцією (поліамідний корпус із латунними різьбовими вставками) та мідних струмопровідних шин з прямокутним перерізом 100×10 мм у ребровому (а) та площинному (б) положенні під дією електродинамічних сил в режимі короткого замикання

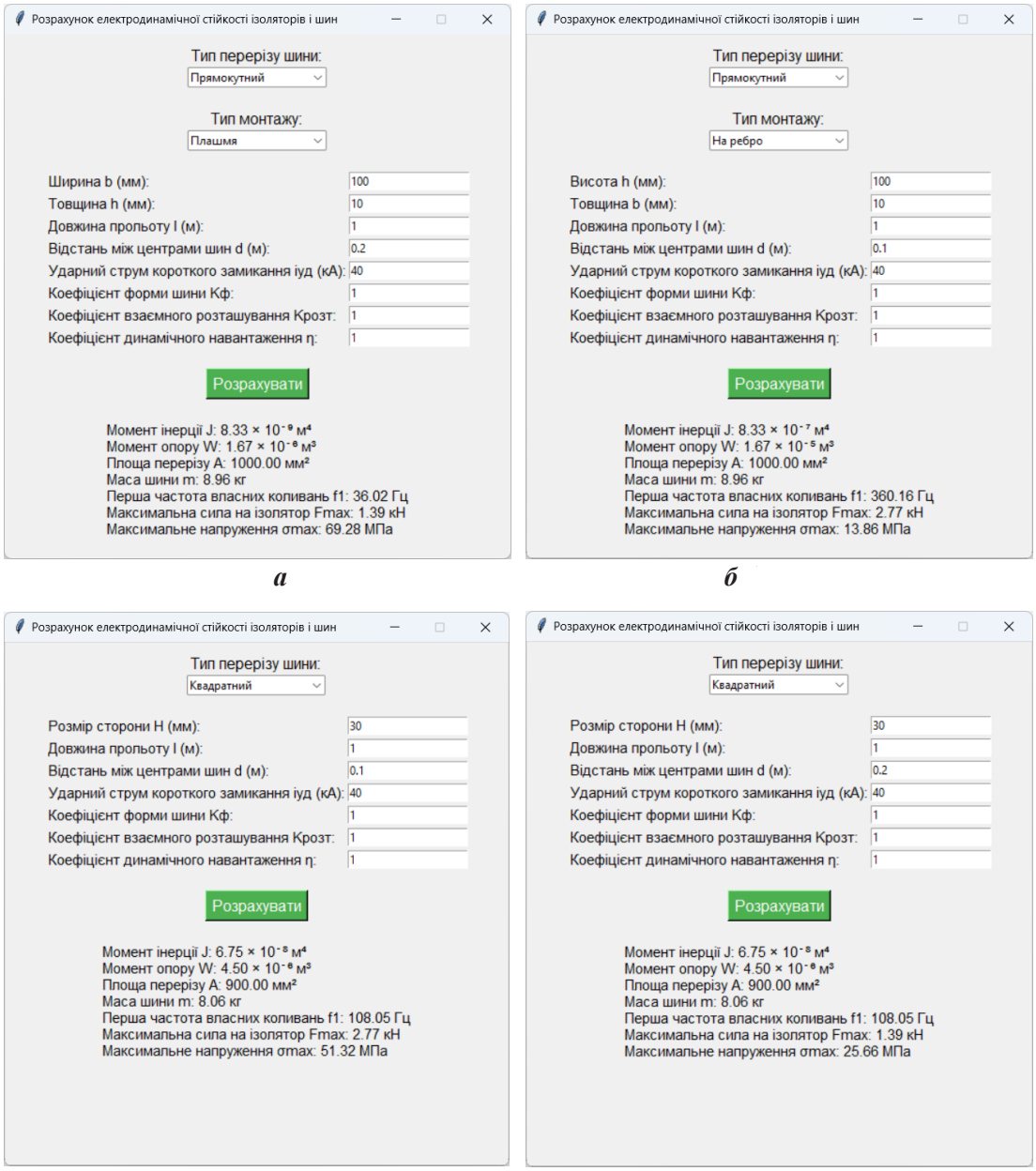


Рис. 5. Вихідні дані та результати розрахунку електродинамічної стійкості ізоляторів і мідних струмопровідних шин при короткому замиканні у судновому ГРЩ: а – шина з прямокутним перерізом при монтажі «плашмя»; б – шина з прямокутним перерізом при монтажі «на ребро»; в-г – квадратний переріз

Список літератури:

1. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А., Несен Л. І. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. для ВНЗ / за ред. Г. Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. 5-те вид., доопрац. та допов. Дніпро: НГУ, 2016. 600 с. URL: https://surl.li/lrxuas (дата звернення: 05.05.2025).

2. Козирський В. В., Гай О. В. Перехідні процеси в енергетиці: навч. посіб. Київ: ЦП «Компринт», 2016. 489 с.

3. Черемісін М. М. Перехідні процеси в системах електропостачання: навч. посіб. Харків: Факт, 2005. 176 с.

4. Шкрабець Ф. П., Плєшков П. Г. Основи електропостачання: навч. посіб. Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010. 408 с. URL: https://surli.cc/zlyjit (дата звернення: 05.05.2025).

5. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден. Т. 4 / редкол.: Севрюков В. В. [та ін.]. 3-тє вид., із змін. та допов. Київ: Логос, 2011. 656 с.

6. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): електротехн. нормат. вид. Офіц. вид. Київ: Мінпаливенерго України, 2017. 584 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf (дата звернення: 05.05.2025).

7. ДСТУ EN 61534-1:2019. Системи шинопроводів. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61534-1:2011 + A1:2014, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 57 с.

8. ДСТУ IEC 60909-4:2008. Струм короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання (IEC TR 60909-4:2000, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2008. 57 с.

9. TIOBE Software. TIOBE Index for April 2025 / TIOBE Software BV. Режим доступу: https://www.tiobe.com/tiobe-index (дата звернення: 05.05.2025).

10. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубєва С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Київ: ДУІТ, 2021. Випуск 3 (34). С. 13–21.

11. Кириченко О.С., Костюченко В.І., Захаров Д.О. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК: науково-технічний журнал. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2017. № 1 (6). С. 60–63.

12. Ізолятори SM / Slavgorenergo. URL: https://slavgorenergo.com.ua/ua/g108757398-izolyatory (дата звернення: 05.05.2025).

13. ДСТУ EN 13601:2010 Мідь та мідні сплави. Пруток, шина та дріт мідні загальної електричної призначеності. Технічні умови (EN 13601:2002, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2011. 22 с.

Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Cherednyk V.M., Kolesnyk V.V., Pristupa S.V., Pastukh O.V.

ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC STABILITY OF INSULATORS AND BUSBARS OF THE MAIN SWITCHBOARD OF A SHIP UNDER SHORT-CIRCUIT CONDITIONS

This paper evaluates the electrodynamic stability of SM 76 composite insulators and copper conductor busbars of rectangular and square cross-section in the ship's main switchboard (*MSB*)*, taking into account their installation position under three-phase short-circuit conditions. The analysis was carried out for a three-phase MSB design with one busbar per phase, which is a typical solution for medium-power shipboard electrical power systems. The busbars of the three phases are arranged in a single horizontal row to simplify installation and reduce space requirements in shipboard environments. This study considers shipboard power grids with copper busbars, which, unlike shore-based systems, require higher conductivity and greater corrosion resistance. The basic mathematical equations that can be used to describe the electrical and mechanical behavior of conductive busbars under three-phase short-circuit conditions are presented.*

In the event of a three-phase short circuit, if the busbars of phases A, B, and C are arranged in a single row, electrodynamic forces are generated, with their directions determined by the busbar layout and instantaneous current directions. Due to the 120° phase shift, the busbars may attract or repel each other at different moments. Attraction occurs when currents flow in the same direction (*electrodynamic convergence*)*, while repulsion occurs when currents flow in opposite directions. In the first few milliseconds after the short circuit, the shock current* (i_{peack}) *reaches its maximum amplitude, generating the highest electrodynamic forces. It is at this moment that the electrodynamic forces can reach critical levels, potentially damaging the busbars or their fasteners.*

The calculation of the electrodynamic stability of the busbars involved determining the moment of inertia, section modulus, natural oscillation frequency, maximum stress in the busbars, and maximum load on the insulators. To perform the calculation, an algorithm was developed, a corresponding flowchart was built, and a program was created using one of the most common technical programming tools – Python. Four case studies of the calculation algorithm application are considered for copper busbars of rectangular (*100×10 mm*) *and square* (*30×30 mm*) *cross-sections, with a span length between insulators of 1 m and a shock current of 40 kA, considering different distances between busbar centers and different installation orientations for rectangular busbars.*

Key words: *electrodynamic stability, insulators, busbars, three-phase short circuit, shipboard main switchboard.*

УДК 621.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/51

Тараненко С.В.
Національний транспортний університет

Кириченко О.С.
Національний транспортний університет

Чередник В.М.
Національний транспортний університет

Колесник В.В.
Національний транспортний університет

Пріступа С.В.
Національний транспортний університет

Мельник В.Ю.
Національний транспортний університет

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ГЕНЕРАТОРА ВІБРАЦІЙ З ОДНИМ СТУПЕНЕМ ВІЛЬНОСТІ

У роботі розглядається імітаційна модель генератора вібрацій електродинамічного типу з одним ступенем вільності та метод її ідентифікації. Відомо, що основними параметрами вібрацій є: амплітуда A (м); частота коливань f (Гц); швидкість V (м/с); прискорення коливального руху W (м/с²); період коливань T (с). Для отримання експериментальних даних, які використовуються у процесі ідентифікації моделі, була проведена серія вимірювань на фізичній моделі генератора за різних вхідних напруг. Оцінювалася координата e_x – величина переміщення якоря генератора. Цей набір даних був задіяний для всього алгоритму ідентифікації моделі генератора вібрацій. Вхідним сигналом для розробленої імітаційної моделі системи є напруга, а вихідними – величини переміщень якоря генератора x_p (при різних вхідних напругах). В процесі ідентифікації моделі проводилось порівняння експериментальних x_e та розрахункових x_p значень.

У роботі описується розроблений генератор вібрацій, його імітаційна модель та метод її ідентифікації. При розробці генератора за основу було використано акустичний динамік 3ГДШ-4-4 електродинамічного типу. Установка включає в себе електродинамічний механізм та координатний пристрій для вимірювання лінійних переміщень x_e з точністю 0,1 мм.

Модель генератора була реалізована з використанням програмного інструментарію для технічного моделювання. Наведено результати вимірювань на установці та розрахункові значення при моделюванні за різних значень вхідної напруги. Проведено порівняльний аналіз отриманих значень x_e і x_p, внаслідок чого методом найменшого середнього квадрата нев'язки було визначено оптимальне значення коефіцієнта жорсткості підвісу (пружини) в імітаційній моделі. Розглянуто приклад використання створеної імітаційної моделі для отримання характеристик при різних значеннях вхідної змінної напруги.

Ключові слова: *ідентифікація моделі, генератор вібрацій, моделювання, координатний пристрій, фізична модель, імітаційна модель.*

Постановка проблеми. Математичне моделювання генераторів вібрацій є важливим інструментом для аналізу й прогнозування їхньої поведінки в різних режимах роботи. Одним із поширених підходів є використання спрощених аналітичних моделей з одним ступенем вільності, які дозволяють зменшити складність розрахунків і зосередитися на основних динамічних характеристиках системи. Проте залишається проблема забезпечення адекватності такої моделі фізичному об'єкту, тобто її здатності точно відтворювати реальні коливальні процеси генератора вібрацій. Тому виникає необхідність у ідентифікації моделі, тобто встановленні параметрів моделі на основі експериментальних даних. Таким чином, постає задача побудови

ідентифікованої моделі генератора вібрацій з одним ступенем вільності, яка б забезпечувала достатню точність для моделювання переміщення рухомої частини генератора за заданих параметрів вхідного сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи ідентифікації систем розглядаються в досить великому переліку публікацій [1–4], а також у роботах [7, 8]. Увага у даних джерелах приділена загальним математичним методам ідентифікації динамічних систем, лінійним, нелінійним, неперервним, дискретним, у часовому просторі, на комплексній площині, у детермінованому і в стохастичному варіантах, з урахуванням зосереджених або розподілених параметрів. Крім того, розглядаються особливості методів стосовно визначених технічних систем та технологічних процесів [4]. У [3] визначається критерій якості ідентифікації, що характеризує адекватність моделі реальному об'єкту, за допомогою середніх втрат. Найменшим середнім втратам відповідає вища якість ідентифікації і навпаки, більшим втратам – гірша якість ідентифікації. Мінімізація функціонала ідентифікації буде відповідати максимізації якості ідентифікації та може досягатися шляхом належного вибору моделі та оцінки значень її параметрів. Процедура вибору та оцінки значень реалізується алгоритмом ідентифікації. При цьому зазначається, що найпоширенішим критерієм якості ідентифікації є квадратичний функціонал у вигляді інтегрального значення квадрата нев'язки на проміжок спостережень.

У [9] зазначено, що основною метою калібрування датчика є визначення його чутливості у робочому діапазоні частот і амплітуд для відповідного ступеня вільності. До важливих факторів належать демпфування, фазовий зсув, нелінійність або варіація вихідного сигналу за зміни амплітуди вхідного сигналу, а також чутливість до температури, тиску та інших зовнішніх умов. До основних характеристик датчика належать амплітудно-частотна (АЧХ) та фазо-частотна (ФЧХ) характеристики. Визначення чутливості датчика здійснюється шляхом вимірювання параметрів збудженого руху або прикладеного вхідного сигналу, сформованого вібраційним генератором, а також відповідного вихідного сигналу самого датчика. Для забезпечення достовірності вимірювань датчик розміщується таким чином, щоб його вісь чутливості була співнаправленою з вектором збудженого переміщення. Застосування контрольованого збурення з регульованими параметрами, амплітуда та частота якого відповідають робочому діапазону датчика, дозволяє проводити калібрування як безперервнодіючих сенсорів, так і датчиків пікових значень. У зв'язку з цим вібраційний генератор є необхідним елементом калібрувальної системи. Під вібраційним генератором розуміють пристрій, здатний створювати та передавати контрольований рух посадкової площини датчика для реалізації метрологічної перевірки.

Проведений аналіз останніх публікацій дозволив обрати алгоритм проведення ідентифікації моделі генератора вібрацій з одним ступенем вільності.

Постановка завдання. Метою статті є представлення результатів дослідження щодо ідентифікації моделі генератора вібрацій електродинамічного типу за методом найменшого середнього значення квадрата нев'язки.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі використовується метод ідентифікації динамічної системи, при якому ця процедура здійснюється шляхом наближення відгуку моделі системи до експериментальних даних. Алгоритм системної ідентифікації [7] показано на рис. 1.

Електродинамічний динамік, опис якого наведено в [5], дає можливість розрахувати залежність механічних характеристик (зсув, швидкість та прискорення) руху мембрани від форми та параметрів прикладеної напруги. На основі такого пристрою був розроблений генератор вібрацій (рис. 2), що складається з кільцевого постійного магніту 3, при цьому магнітний ланцюг утворюється через верхній і нижній фланці 2 та керн 4.

У повітряному зазорі магнітного ланцюга знаходиться гільза 6 з намотаною на неї котушкою індуктивності. Котушка 5 при підключенні живлення через контакти 10 стає чутливою до впливу електромагнітної сили згідно з законом Ампера. В результаті дії цієї сили гільза 6 і котушка 5 набуває прискорення (позначено стрілкою на рис. 2, б) в залежності від напрямку електричного струму в котушці 5. При цьому електромагнітна сила демпфується пружиною 7 з коефіцієнтом жорсткості k. Верхня частина пружини 7 жорстко закріплена до кришки корпусу 1, нижня частина – до гільзи 6. Крім того, гільза 6 жорстко з'єднана зі штангою 8, яка проходить крізь пружину 7 і через отвір у кришці корпусу 1. До штанги 8 прикріплена посадкова поверхня датчика 9. Сукупність елементів, що утворюють рухливу частину генератора, а саме

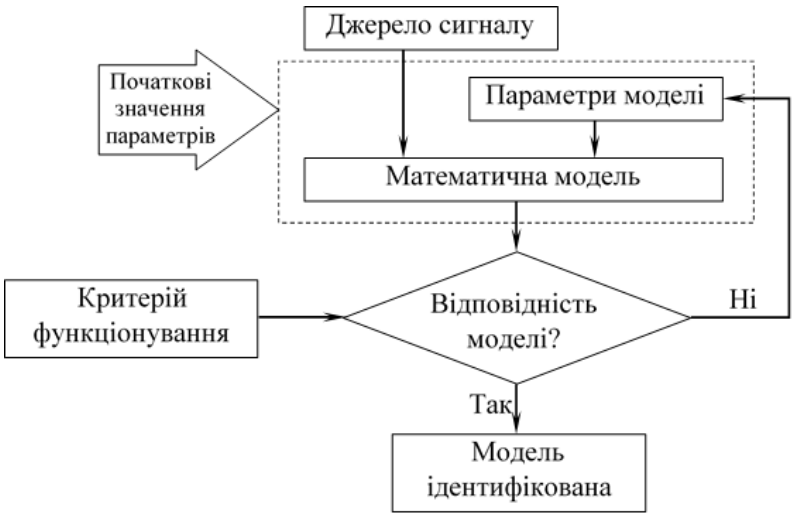
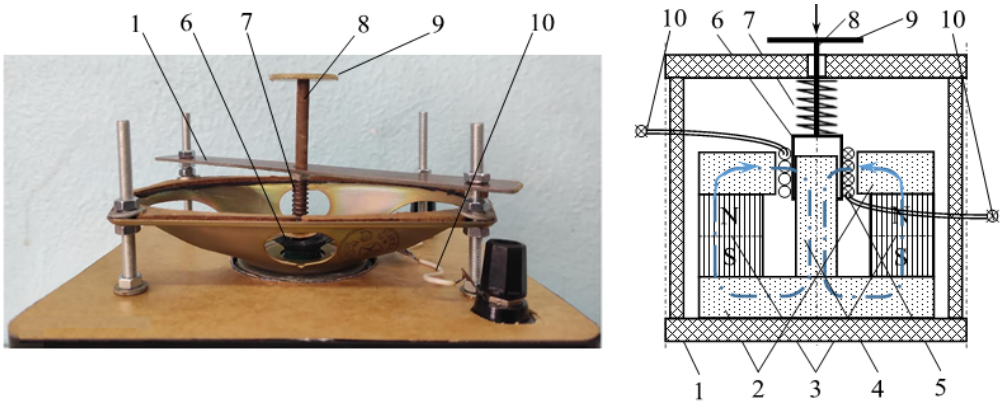


Рис. 1. Алгоритм ідентифікації системи



а *б*

Рис. 2. Генератор вібрацій: а – загальний вид; б – схематичне креслення

гільза, котушка індуктивності, штанга і посадкова поверхня датчика, будемо називати якорем з масою m.

У положенні рівноваги, при відсутності струму в котушці, вага якоря генератора врівноважується пружною силою пружини. Якщо координату x, що визначає положення якоря у будь-який момент руху, відраховувати від положення рівноваги, то рівняння його руху матиме вигляд:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k \cdot x = F_{\text{ем}}, \qquad (1)$$

де $F_{\text{ем}}$ – сила електромагнітної взаємодії.

Враховуючи те, що еквівалентна схема з'єднання котушки індуктивності складається з послідовно з'єднаних індуктивності L, опору R та джерела е. р. с. e рівняння для струму в цьому ланцюгу наступне:

$$L\frac{di}{dt} + R \cdot i = e + e_{\text{інд}}, \qquad (2)$$

де $e_{\text{інд}}$ – е. р. с. індукції, що виникає в ланцюзі під час руху якоря.

Сила електромагнітної взаємодії $F_{\text{ем}}$ розраховується за формулою:

$$F_{\text{ем}} = i \cdot l \cdot B = N \cdot 2\pi r \cdot B \cdot i, \qquad (3)$$

де $l = N \cdot 2\pi r$ – загальна довжина провідника зі струмом, що знаходиться в полі постійного магніту; r – радіус котушки; N – число витків в котушці; B – магнітна індукція постійного магніту.

Величину е. р. с. індукції $e_{\text{інд}}$ розраховується за виразом:

$$e_{\text{інд}} = -\frac{d\Psi}{dt}, \qquad (4)$$

де $d\Psi$ – приріст потокозчеплення, як сумарного магнітного потоку через поверхню, утворену витками котушки індуктивності при її

переміщенні на відстань *dx* протягом проміжку часу *dt*. Згідно визначення, потокозчеплення розраховується:

$$d\Psi = N \cdot d\Phi, \tag{5}$$

$$d\Phi = B \cdot dS = B \cdot 2\pi r \cdot dx, \tag{6}$$

де $d\Phi$ – магнітний потік через поверхню, що утворюється одним витком котушки при її поздовжньому русі.

Крім того, при розрахунку потокозчеплення і, отже, сили електромагнітної взаємодії необхідно враховувати наступне. Котушка індуктивності за відповідного переміщення може виходити з магнітного ланцюга (переміщення вгору на рис. 2, б), тим самим зменшується кількість витків що знаходяться в полі постійного магніту. У спрощеному вигляді врахувати цей факт можна в такий спосіб. Нехай початкове становище котушки таке, що її верхній край збігається з верхньою поверхнею верхнього фланця 2 на рис. 2, б. Тоді при подачі постійної напруги відповідної полярності, котушка під впливом сили електромагнітної взаємодії $F_{ем}$ переміститься вгору в точку з координатою *x*, при цьому кількість витків у полі постійного магніту буде рівною:

$$N = N_к - \frac{N_к}{h_к} \cdot x = N_к \cdot \left(\frac{h_к - x}{h_к} \right), \tag{7}$$

де $h_к$ – висота намотування котушки.

З урахуванням виразів (5) – (7) формулу (4) можна переписати у вигляді:

$$e_{інд} = -N \cdot B \cdot 2\pi r \cdot \frac{dx}{dt} = -N_к \cdot \left(\frac{h_к - x}{h_к} \right) \cdot B \cdot 2\pi r \cdot \frac{dx}{dt}. \tag{8}$$

У рівняннях (3) та (8) присутній однаковий множник, який позначимо як коефіцієнт електромеханічної зв'язку:

$$\chi = N \cdot B \cdot 2\pi r = N_к \cdot \left(\frac{h_к - x}{h_к} \right) \cdot B \cdot 2\pi r. \tag{9}$$

З урахуванням вище зазначеного, рівняння (1) та (2) можна переписати у вигляді системи двох рівнянь:

$$\begin{cases} m \cdot \dfrac{d^2x}{dt^2} + k \cdot x - \chi \cdot i = 0 \\ L \dfrac{di}{dt} + \chi \cdot \dfrac{dx}{dt} + R \cdot i = e \end{cases} \tag{10}$$

Для практичного аналізу за допомогою засобів імітаційного моделювання систему (10) зручно перетворити [6]:

$$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{1}{L} \cdot \left[e - \chi \cdot \dfrac{dx}{dt} - R \cdot i \right] \\ \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{1}{m} \cdot \left[-k \cdot x + \chi \cdot i \right] \\ \dfrac{dx}{dt} = v \end{cases} \tag{11}$$

На основі системи рівнянь (11) була розроблена модель генератора вібрацій (рис. 3).

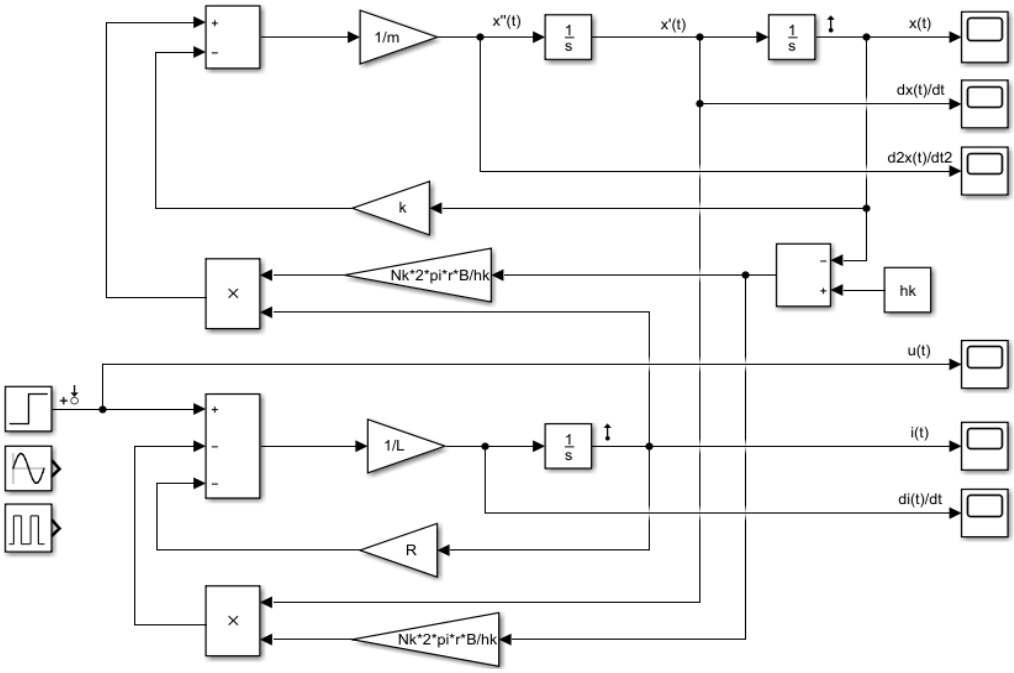


Рис. 3. Імітаційна модель генератора вібрацій

Параметри імітаційної моделі та їх значення наведені у табл. 1. Індуктивність котушки L вимірюна за допомогою мультиметра APPA 701. Маса якоря оцінена експериментально.

Для отримання набору даних, при яких здійснювався процес ідентифікації моделі, була проведена серія вимірювань на фізичній моделі генератора (рис. 2) за різних вхідних напруг. Вимірюванням піддавалася координата x – величина переміщення посадкової поверхні 9, як показано стрілкою на рис. 2, б. Ці вимірювання є набором даних для всього алгоритму ідентифікації моделі генератора вібрацій та його системної моделі, коли вхідними даними для моделі системи є вхідна напруга, а вихідними даними є величини переміщення якоря генератора $x_р$, які в кінцевому підсумку порівнюються з виміряними значеннями $x_е$.

У табл. 2 наведено виміряна координата $x_е$ залежно від прикладеної напруги $u(t_0)$.

Для побудови набору вихідних характеристик моделі генератора вібрацій була проведена серія розрахунків за різних вхідних напруг:

$$u(t) = u(t_0) \cdot \sigma(t - t_0),$$

де $\sigma(t - t_0)$ – одинична функція Хевісайда; $u(t_0)$ – значення напруги в момент часу t_0. Для розрахунків прийнято t_0.

Таким чином, коефіцієнт жорсткості пружини k визначався в процесі ідентифікації моделі генератора вібрацій за критерієм середнього значення квадрата нев'язки. При вибраному коефіцієнті жорсткості пружини k в результаті були отримані розрахункові значення координати $x_р$ (табл. 2) при тих же значеннях вхідної напруги $u(t_0)$.

На рис. 4, а у графічному вигляді наведено сімейство розрахункових вихідних характеристик моделі генератора вібрацій при різних значеннях вхідної напруги, а на рис. 4, б графіки залежності x_e та x_p від вхідного напруги $u(t_0)$.

Середнє значення квадрата нев'язки при вибраних значеннях параметрів моделі визначалося за формулою:

$$\Delta x_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{ei} - x_{pi})^2}{n}, \qquad (12)$$

де n = 10 – число елементів набору даних. Після підстановки значень з табл. 2 у формулу (12) отримаємо $\Delta x_{ср} = 0,03$.

З використанням моделі (рис. 3) були також отримані перехідна, амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики наведені на рис. 5.

Аналіз перехідної характеристики (рис. 5, а) показує, що перегулювання складає:

$$\eta = \frac{x_{max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{6,13 \cdot 10^{-4} - 4,76 \cdot 10^{-4}}{4,76 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\% = 28.7\%$$

де x_{max} – амплітудне значення величини переміщення якоря; $_{\infty}$ – значення величини переміщення якоря в режимі, що встановився.

Таблиця 1

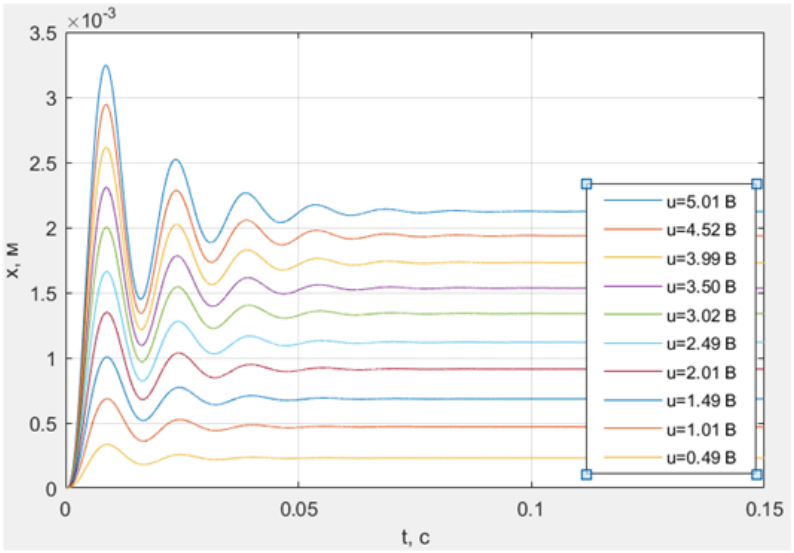
Параметри моделі та їх значення

№	Параметр		Одиниця вимірювання	Значення
	Найменування	Позначення		
1	Маса якоря	m	кг	0,010
2	Коефіцієнт жорсткості пружини	k	Н/м	1400
3	Індуктивність котушки	L	Гн	0,0036
4	Висота намотування котушки	h_k	м	0,019
5	Число витків котушки	N_k	од.	50
6	Радіус котушки	r	м	0,0081
7	Індукція магнітного поля в повітряному зазорі	B	Тл	1,05
8	Резистивний опір котушки	R	Ом	4,0

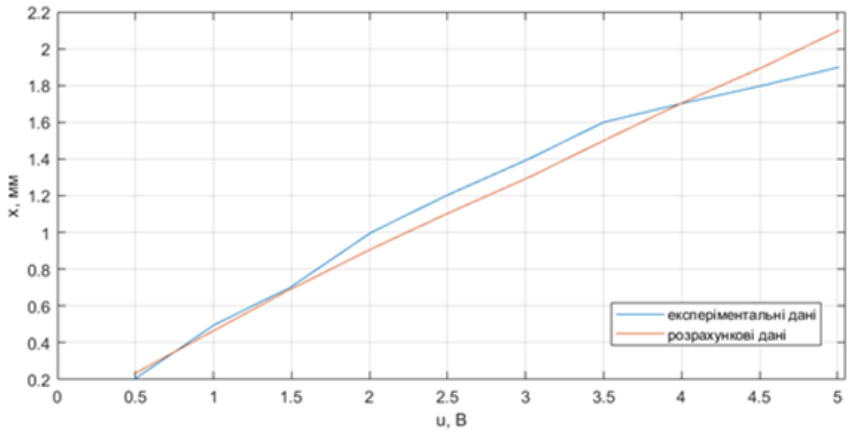
Таблиця 2

Набір даних для ідентифікації системи

$u(t_0)$,В	0,49	1,01	1,49	2,01	2,49	3,02	3,50	3,99	4,52	5,01
$x_е$, мм	0,20	0,50	0,70	1,00	1,20	1,40	1,60	1,70	1,80	1,90
$x_р$, мм	0,23	0,47	0,69	0,91	1,10	1,30	1,50	1,70	1,90	2,10
$x_е$-$x_р$	-0,03	0,03	0,01	0,09	0,10	0,10	0,10	0,0	-0,10	-0,10

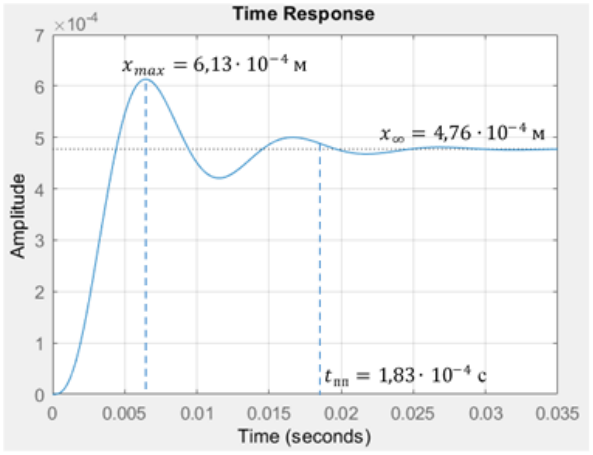


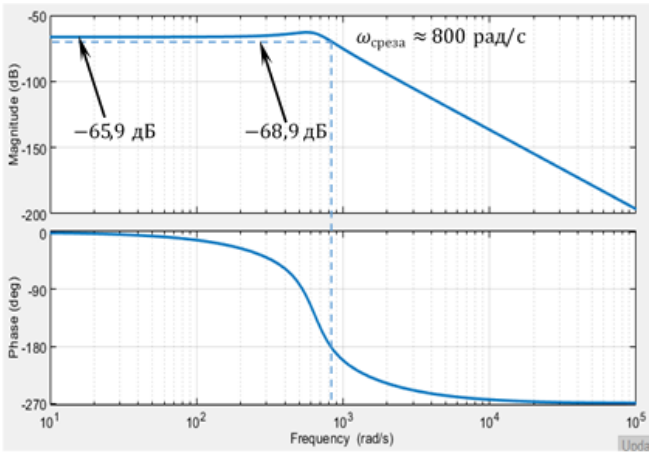
а



б

Рис. 4. Графічне представлення результатів моделювання та вимірювань:
***а* – сімейство розрахункових вихідних характеристик моделі;**
***б* – графіки розрахункових $x_р$ і виміряних значень $x_е$**





а *б*

Рис. 5. Характеристики моделі генератора вібрацій:
***а* – перехідна; *б* – логарифмічні амплітудно-частотна та фазо-частотна**

Як відомо, тривалість перехідного процесу у системі характеризує її швидкодію, а його характер визначає якість системи [10]. За кількісну характеристику тривалості перехідного процесу приймають час, за який вихідний сигнал наближається до свого сталого значення, тобто, час, після закінчення якого виконується нерівність:

$$|x - x_\infty| \ll \varepsilon,$$

де ε – наперед задане позитивне число. Для $\varepsilon = 0,03 \cdot x_\infty$ – тривалість перехідного процесу $t_{пп} = 1,83 \cdot 10^{-4} = 18,3$ мс.

За допомогою амплітудно-частотної характеристики визначається смуга пропускання на рівні -65,9 дБ з частотою зрізу на рівні -68,9 дБ – її значення складає $\omega = 800$ рад/с або $f_{зр} = \dfrac{800}{2 \cdot \pi} = 127$ Гц.

Для оцінки отриманих результатів моделювалася подача сигналу з частотою, що лінійно змінюється в часі:

$$f(t) = 400 \cdot t, 0 \le t \le 0,5c.$$

На рис. 6 представлені графіки переміщення якоря генератора вібрацій x і напруги u з частотою $f(t)$, що лінійно змінюється. Для приведення до одного масштабу значення напруги показано з коефіцієнтом 0,001.

На графіку частота зрізу $f_{зр} = 127$ Гц відповідає:

$$t = \frac{127}{400} = 0,32c.$$

Аналіз результату розглянутого прикладу підтверджує, що при часі $t > 0,32c$ ($f > 127$ Гц) значення $x \to 0$, тому доцільно використовувати розроблений генератор вібрацій на частотах вхідної напруги до 130 Гц.

Висновки. У статті представлено розроблений на основі акустичного динаміка 3ГДШ-4-4 генератор вібрацій електродинамічного типу, його імітаційна модель та результати її ідентифікації за методом найменшого середнього квадрата нев'язки. Наведено математичні залежності, що дозволяють оцінювати механічні параметри руху якоря генератора, зокрема величину переміщення залежно від прикладеної напруги. Промодельовано поведінку системи за різних форм і рівнів вхідних сигналів. Подальші дослідження будуть спрямовані на отримання передавальної функції генератора вібрацій та оцінку вихідних характеристик п'єзоелектричного датчика вібрацій.

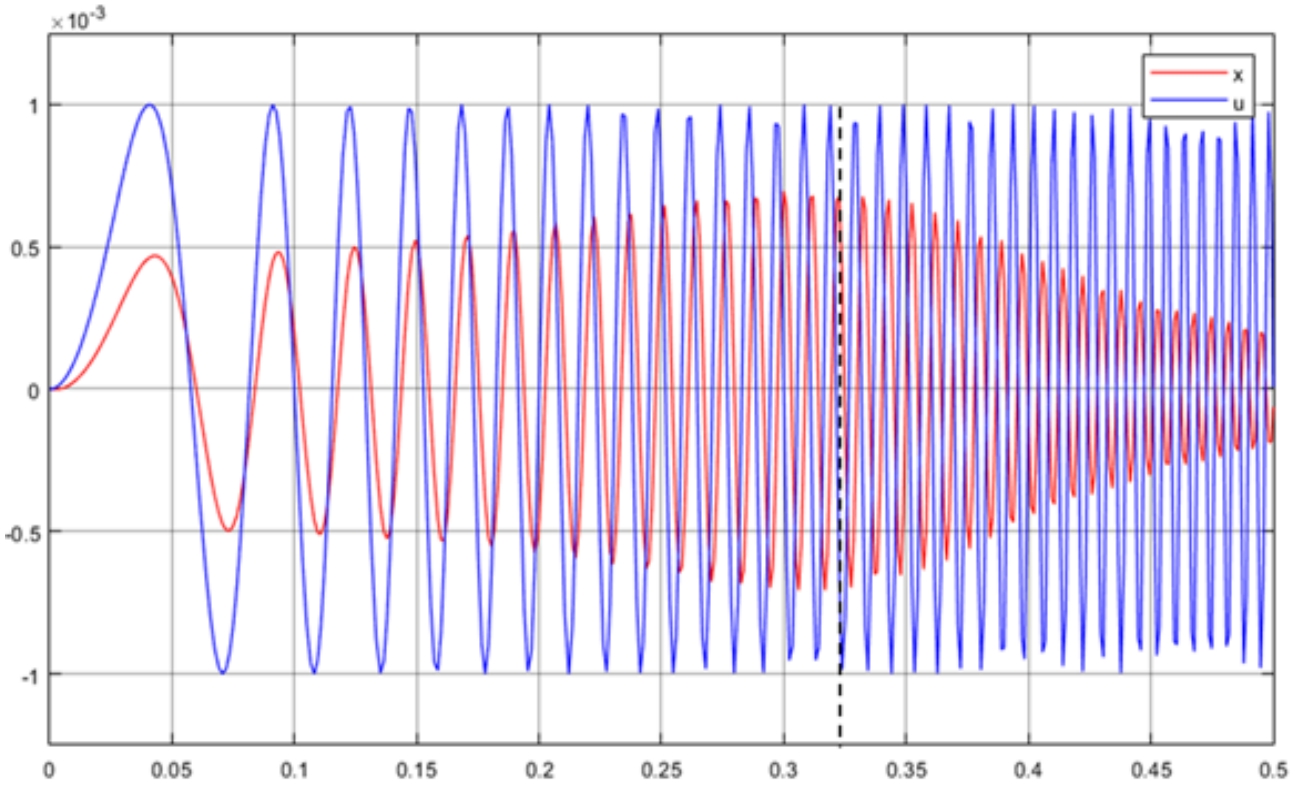


Рис. 6. Графіки переміщення якоря генератора вібрацій *x* і напруги *u* з частотою, що лінійно змінюється

Список літератури:

1. Мокін Б.І. Математичні методи ідентифікації динамічних систем: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 260 с. URL: http://www.mokin.com.ua/files/articles/59/34/Mokin_MMIDS_2010.pdf (дата звернення: 15.05.2025).
2. Левчук І.І. Л., Манко Г.І., Трішкін Ст.Я., Корсун В.І. Теорія та практика ідентифікації об'єктів управління: монографія. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2019. 203 с. URL: https://citm.ho.ua/Txt/Mono.pdf (дата звернення: 15.05.2025).
3. Коваль О.В. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів: навч. посібник/О.В. Коваль. Житомир: ЖДТУ, 2018. 133 с. URL: https://surl.lu/glisdz (дата звернення: 15.05.2025).
4. Павленко І.В., Симоновський В.І. Методи ідентифікації параметрів математичних моделей коливальних процесів: монографія. Суми: Сумський державний університет, 2020. 145 с. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/324228074.pdf (дата звернення: 15.05.2025).
5. Lissek, H., Boulandet, R., & Fleury, R. Electroacoustic absorbers I: Bridging a gap between active acoustic feedback control and shunt loudspeakers. Lausanne, Switzerland, 2011. URL: https://surl.li/rmggdc (дата звернення: 15.05.2025).
6. Furlani E.P. Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analysis, and Applications. San Diego: A Harcourt Science and Technology Company, 525 B Street, Suite 1900, 92101-4495, USA, 518 p. URL: https://surl.li/dhhlzq (дата звернення: 15.05.2025).
7. Levy D.A., Shapiro A. System Identification and Mathematical Modeling of A Piezoelectric Actuator through A Practical Three-Stage Mechanism. Beer-Sheva: Israel. URL: https://www.mdpi.com/2072-666X/14/1/88 (дата звернення: 15.05.2025)
8. Song J., He C., Wang R., Xue C., Zhang W. A Mathematical Model of a Piezo-Resistive Eight-Beam Three-Axis Accelerometer with Simulation and Experimental Validation. Taiyuan: China. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3641 (дата звернення: 15.05.2025)
9. ДСТУ ГОСТ ИСО 5347-0-95 Вібрація. калібрування датчиків вібрацій та удару Частина 0. Загальні становища. порада по стандартизації, метрології та сертифікації. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=92839 (дата звернення: 15.05.2025)
10. Тараненко С.В., Пріступа С.В., Колесник В.В., Пастух О.В., Голубєва С.В. Удосконалення системи управління гребними електрорушіями при плаванні в умовах хитавиці. Вісник СНУ ім. В. Даля. Випуск 8 (264). 2020. С. 51–55. DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-51-55

Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Cherednyk V.M., Kolesnyk V.V., Pristupa S.V., Melnik V.Yu.

IDENTIFICATION OF A SINGLE-DEGREE-OF-FREEDOM VIBRATION GENERATOR MODEL

This paper examines a simulation model of an electrodynamic-type vibration generator with a single degree of freedom and a method for its identification. It is known that the main parameters of vibration include amplitude A (m), oscillation frequency f (Hz), velocity V (m/s), acceleration W (m/s²), and oscillation period T (s). To obtain experimental data for model identification, a series of measurements was conducted on a physical prototype of the generator under various input voltages. The coordinate x_e, representing the displacement of the generator's armature, was evaluated. This dataset was used throughout the generator model identification algorithm. The input signal for the developed simulation model is the voltage, and the output signals are the displacement values of the generator's armature x_r (at different input voltages). During the identification process, the experimental values x_e were compared with the simulated values x_r.

The paper describes the developed vibration generator, its simulation model, and the identification method. The basis for the generator's design was the acoustic speaker 3ГДШ-4-4 of the electrodynamic type. The experimental setup includes an electrodynamic mechanism and a coordinate device for measuring linear displacements x_e with an accuracy of 0.1 mm.

The generator model was implemented using technical modeling software. The paper presents the results of measurements from the experimental setup and the simulated values under different input voltages. A comparative analysis of the obtained x_e and x_r values was performed, resulting in the determination of the optimal stiffness coefficient (spring constant) in the simulation model using the least mean square error method. Example is provided to illustrate the application of the developed simulation model for deriving system characteristics under various input voltage conditions.

Key words: *model identification, vibration generator, electrodynamic mechanism, coordinate measuring device, physical model, simulation model.*

UDC 629.424.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/52

Fomin O.V.
National Transport University

Lohvinenko O.A.
Ukrainian State University of Railway Transport

Kuzmenko S.V.
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

Zaverkin A.V.
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

CLASSIFICATION OF POSITIVE-ACTION COMPRESSORS FOR RAILWAY ROLLING STOCK

The article considers the classification of positive displacement compressors, which are widely used in pneumatic systems of traction and railcar rolling stock. An analysis of modern technical solutions in the field of compressor construction, as well as current classifications used in scientific and industrial literature, is carried out. The main attention is paid to the systematization of compressors depending on the design features, operating mode, number of compression stages, type of drive, availability of lubricant, as well as the scope of application (*locomotives, electric trains, diesel trains, subway cars, etc.*).

The need to build a generalized classification scheme is formulated, which considers both traditional and modern technical solutions used in modern railway transport. A multi-level classification structure of positive displacement compressors has been developed, covering their main types – piston, diaphragm, screw and others, with a detailed consideration of the design and operational characteristics of each of them. The advantages and disadvantages of different types of compressors were determined in terms of their operating conditions, maintainability, energy efficiency and maintenance costs.

The study considered data from technical documentation and catalogs of leading manufacturers of compressor equipment, such as Poltava Turbomechanical Plant, Transpneumatics, Atlas Copco, CKD, etc. The prospects for the application of modern energy-saving technologies in compressor installations, in particular, inverter control of productivity and oil-free systems, were analyzed. Conclusions were drawn on the feasibility of introducing a single classification system into the regulatory and technical framework to facilitate the selection of compressor equipment at the stages of design and operation of rolling stock.

It is noted that the results of the study can be used in the practice of engineering design, maintenance, modernization of pneumatic systems of rolling stock and serve as the basis for further scientific research aimed at optimizing the design and increasing the efficiency of compressor units for railway transport.

Key words: *transportation, mechanics, railway transport, transport technologies, rolling stock, repair, operation, reliability, compressors.*

Formulation of the problem. The growth of railway traffic in Ukraine requires increasing the reliability and efficiency of rolling stock. One of the key systems that ensures the safety and functionality of trains is the pneumatic system, the heart of which is the compressor. Currently, the most widespread in air supply systems are positive displacement compressors, the effective operation of which has a direct impact on the functioning of the brake system, pneumatic drives and other auxiliary mechanisms.

Today, there are a variety of designs of positive displacement compressors used in railway rolling stock. However, there is no clear and systematic classification of these units considering their design features, technical characteristics and areas of application on different types of rolling stock.

Insufficient systematization complicates the process of selecting the optimal type of compressor for specific operating conditions and technical requirements. This leads to difficulties in designing new and modernizing existing pneumatic systems of rolling stock. In addition, the lack of a unified classification complicates the analysis of their reliability, maintenance and development of effective repair strategies.

Thus, there is an urgent need to develop a scientifically based classification of positive displacement compressors used in railway rolling stock. Such a classification will help optimize the choice of compressor equipment, increase the efficiency and reliability of pneumatic systems, and simplify the processes of their operation and maintenance. Solving this scientific and applied problem is of great importance for the further development of railway transport in Ukraine.

Analysis of recent research and publications. The study [1] proposes an innovative method for classifying the condition of diesel-electric locomotive compressors based on vibration signal analysis using machine learning. The authors developed an algorithm that shows 5 main types of faults with 94% accuracy, including cylinder wear and valve defects. The results are especially relevant for freight transportation, where compressor reliability is critical.

In the article [2], a comprehensive thermodynamic analysis of the operation of screw compressors in pneumatic systems of high-speed trains is presented. The authors found that changing the geometry of the screws by 5° increases the efficiency by 7–8% when operating at high speeds. The work is of great importance for the development of new generations of compressors for high-speed lines.

A study [3] analyzed the failure statistics of brake compressors using Weibull distribution based on data from 43 railway depots. The authors proposed a modified preventive maintenance schedule that reduces the probability of failure by 25%. The results have already been implemented in some parts of India, demonstrating significant cost savings.

The work [4] is devoted to the optimization of the design of twin-screw compressors for energy-efficient metro trains. Using multi-criteria optimization methods, the authors achieved a 15% reduction in energy consumption while maintaining performance. The study is especially relevant for cities with intensive metro traffic, where energy saving is a critical factor.

In the article [5], a comprehensive comparison of the efficiency of traditional lubricated and lubricated-free compressors in urban rail transport conditions is carried out. The study contains recommendations for choosing the type of compressor depending on the operating conditions and environmental requirements.

The study [6] introduces an innovative predictive maintenance system for reciprocating compressors in freight trains using artificial intelligence. The developed algorithm based on a neural network analyzes vibration sensor data in real time, achieving a failure prediction accuracy of 91%.

In the article [7], a new method for detecting faults in scroll compressors using acoustic emission analysis is presented. The system is particularly effective for detecting microcracks in scroll elements. The study offers a new approach to monitoring high-precision compressor systems.

In the work [8], the strength of the supporting structure of a freight car made of round pipes during sea transportation is investigated. Experimental data were obtained during real voyages in the Black Sea. The study is of great importance for the safety of combined rail-sea transportation.

Continuing the previous study, the work [9] focuses on the analysis of fastening of gondola cars using viscous couplings. The authors developed recommendations for the optimal number and location of fasteners. The results have already been implemented in the operational practice of some shipping companies, increasing the safety of transportation.

The study [10] proposes an innovative system for utilizing waste heat from compressors in railway rolling stock. Particular attention is paid to adapting the system to the existing infrastructure. The results open new opportunities for increasing the energy efficiency of railway transport.

The study [11] conducts a comprehensive comparative analysis of the life cycle costs of different types of compressors in regional trains. The authors developed a unique cost estimation model that takes into account energy efficiency, maintenance costs and environmental impact.

Experimental work [12] analyzes the efficiency of variable speed compressors in hybrid trains. The results show a reduction in energy consumption by 18–22% compared to traditional systems under variable loads. A feature of the study is a comprehensive assessment of the impact of rotation speed on the resource of the unit.

An innovative study [13] uses CFD methods to analyze air flows in piston compressors of high-speed trains. The authors developed a three-dimensional model that accurately reproduces the processes in the compression chamber with an error of less than 3%. The results open new opportunities for optimizing the energy efficiency of compressor systems.

The study [14] is devoted to determining the optimal parameters of on-board energy storage systems for metro rolling stock. The authors developed a unique capacity calculation method that considers the line profile and the schedule of movement.

Of value is the analysis of the interaction of the storage system with the traction drive. The results have already been implemented on some lines of the Ukrainian metro.

Continuing the previous study, the work [15] focuses on determining the rational parameters of capacitive systems for underground transport. The authors proposed a new charging/discharging control algorithm that increases the efficiency by 8–10%. The results of the study are important for the development of energy-efficient technologies in urban transport.

The study [16] introduces an innovative IoT system for real-time monitoring of the condition of railway compressors. The system is particularly effective for remote depots with limited access to specialists. The results open up new opportunities for the digital transformation of railway infrastructure.

In the article [17], a comprehensive solution for noise reduction (up to 8 dB) and vibration in piston compressors of suburban trains is presented. The study offers a unique methodology for balancing efficiency and cost of modernization.

The work [18] presents a systematic analysis of 12 modern sealing technologies for rotary compressors, including: polymeric materials (lifetime up to 50,000 hours); laser surface texturing (wear – 30%); magnetic seals (for oil-free systems). The review contains unique data on the influence of microtextured on tightness.

Innovative research [19] presents a new generation of lightweight and environmentally friendly materials for compressors: aluminum foam structures; biopolymer composites; carbon nanotubes in a matrix. The results are in line with the EU's goals for decarbonizing transport by 2050.

The analysis of the literature clearly shows that insufficient attention is paid to the issue of classifying positive displacement compressors used in railway rolling stock. Existing approaches are often fragmentary and do not cover all important aspects of the functioning of these units. The lack of a single, clearly structured classification complicates the comparative analysis of different types of compressors. It also prevents the systematization of knowledge about their design features, operational characteristics and areas of application in railway transport. This situation can lead to inefficient equipment selection and complicate the development of optimal air supply systems for rolling stock. Therefore, the need for in-depth and comprehensive research to develop a comprehensive classification is obvious and urgent.

Analysis of existing technical documentation and regulations allowed to identify current standards and approaches to the classification of compressor equipment in railway transport. Systematization and generalization of literary sources provided a theoretical basis for the development of an improved classification, considering various design features and functional characteristics of compressors. A comparative analysis of the technical characteristics and principles of operation of different types of positive displacement compressors used in rolling stock revealed their advantages and disadvantages. Development of a structural classification scheme based on certain criteria (for example, principle of operation, number of compression stages, type of drive) contributed to a clear and logical division of compressors into groups. An expert survey of specialists in the field of railway transport and compressor equipment production helped to verify the proposed classification and consider practical operating experience. Practical testing of the developed classification on the example of specific models of compressors used in rolling stock of Ukrainian railways confirmed its versatility and practical value.

Task statement. The purpose of the study is to systematize existing types of compressors to optimize their selection and application, according to the main design and functional features. The developed multi-level hierarchical classification structure allows to systematize existing and new types of compressors. The results of the study can be used to develop recommendations for improving the efficiency of pneumatic systems of railway transport. They are a theoretical basis for optimizing the selection and design of compressor equipment for railway transport.

Outline of the main material of the study. The main components of compressor units installed on modern railway rolling stock and subway cars (Fig. 1) are: compressor – 1; air dryer with built-in pre-cleaning filter – 2; device for collecting and removing condensate – 3; fine oil filter – 4; safety valves – 5 and 6, which prevent the occurrence of unacceptably high pressure in the event of various malfunctions; receiver – 7. After the compressor, the air compressed to 8.5–10 bar, which contains oil and water in the form of drops or steam, is subjected to special treatment to prevent them from entering pneumatic networks.

After the compressor, the air enters the air dryer, where the main part of the impurities created by the droplets is precipitated mechanically, and the

remaining part is removed by special moisture absorbers. If necessary, the compressed air is additionally cooled and passed through a fine oil filter. The condensate accumulated in the air dryer must be collected for further disposal. It should be noted that in oil-free compressors, the need for a condensate collection and removal system, as well as a fine oil filter, is eliminated.

Research of scientific and technical documentation and operating experience have allowed to formulate the main requirements for compressors of modern rolling stock: compressors must fully satisfy the needs of the train in compressed air at its highest consumption; their performance must be at the level necessary to create the set pressure in the main tank for a certain time; the reliability of the compressors must correspond to 0.003 failures per thousand hours of operation; power consumption at the level of 8 kW per compression of 1 m^3/min; specific gravity not more than 70 kg (without engine) per 1 m^3/min of compressor supply.

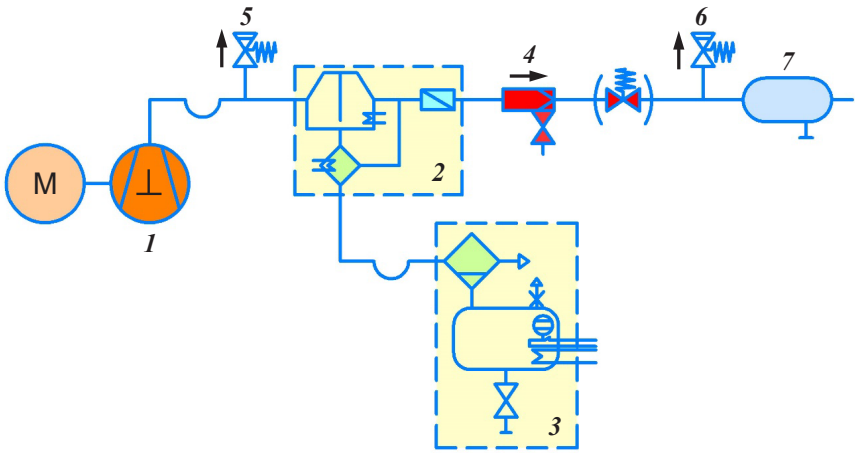


Fig. 1. Scheme of the compressor installation

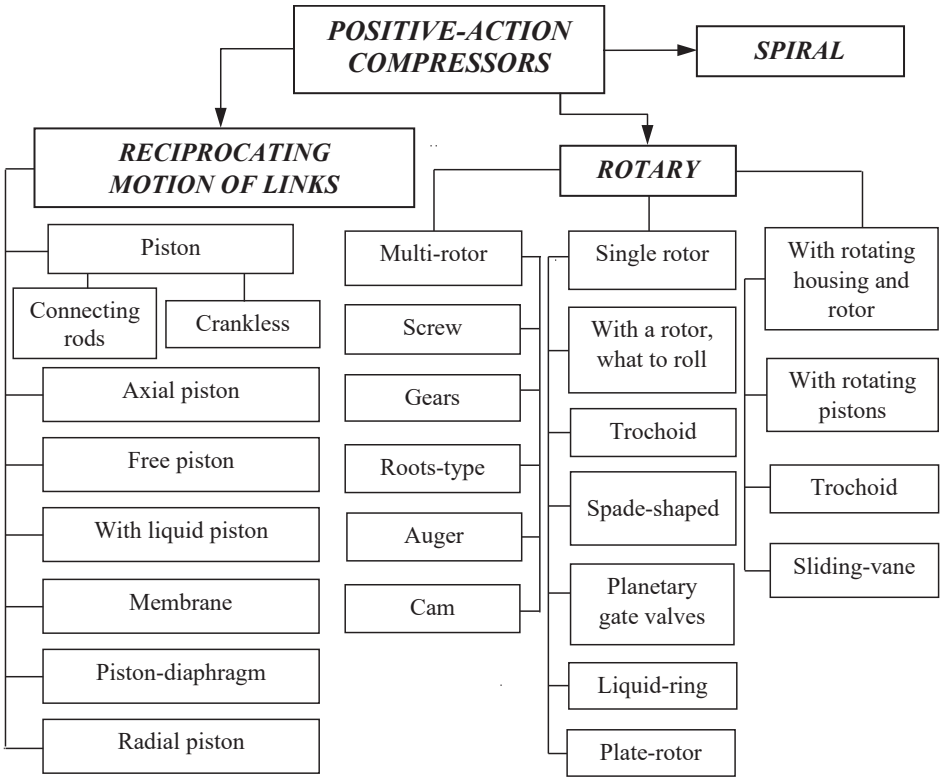


Fig. 2. Classification of positive displacement compressors

Analysis of scientific and technical literature allowed us to develop a classification scheme for existing positive displacement compressors (Fig. 2), which can be used in air supply systems and installed on traction units (diesel locomotives, electric locomotives, electric trains, diesel trains, railcars, and subway cars) to provide compressed air to automatic braking devices, control devices, and auxiliary mechanisms.

Below in Table 1 (DL – diesel locomotive, EL – electric locomotive, DT – diesel train, MC – metro car, ERS – Electric Rolling Stock) technical characteristics of some of the listed compressors are given, the analysis of which allows to assess the compliance of piston compressors with the above requirements.

From the analysis of the data in Table 1, the air supply systems of modern traction and railcar rolling stock in difficult operating conditions (significant vibrations and significant fluctuations in the external temperature) are mainly based on piston compressors (). Their design features determine their significant weight and size indicators and significant power consumption for the drive (for example, according to research results: the working volume of the KT-7 compressor exceeds 1 m^3, the mass is 646 kg, the power consumption for the drive is 44 kW – 2% of the effective power of the locomotive power plant), and the differences in the operating conditions of compressors on diesel and electric locomotives determine their differences in design.

As the conducted studies have shown, the piston compressors of modern traction and multi-rail rolling stock of Ukrzaliznytsia, with sufficient productivity and satisfactory operational reliability, are characterized by rather large mass-dimensional

Table 1

Technical characteristics of compressors of modern traction rolling stock

Indicator \ Compressor type	КТ6,7	КТ6ЭЛ	К3	ПК-5,25	ПК-3,5
Rolling stock type	DL	EL	EL	DL	DL
Productivity, $м^3$/min	5,3	5,3/2,75	4,1	5,25	3,5
Number of revolutions, rpm	850	850/440	1250	1450	1450
Power consumption, kW	44	44	37	37	27,5
Discharge pressure, MPa	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9
Number of compression stages	2	2	2	2	2
Weight of the compressor, kg	646	630	410	310	200
Cylinder position	W	W	W	V	V
Overall dimensions, mm					
- length	760	760	1043	805	625
- width	1320	1255	867	835	835
- height	1105	1105	911	670	670

Continuation of table 1

Indicator \ Compressor type	ПК-1,75	Э-500	ВП3-4/9	ВВ-1,5/9
Rolling stock type	DL	EL, DL	DL	DL, DT
Productivity, $м^3$/min	1,75	1,75	3	1,5
Number of revolutions, rpm	1450	200	1000	1000
Power consumption, kW	13,3	15	21	15
Discharge pressure, MPa	0,9	0,9	0,9	0,9
Number of compression stages	2	2	2	2
Weight of the compressor, kg	125	670	344	238
Cylinder position	V	Horizontal	V	Vertical
Overall dimensions, mm				
- length	460	717	526	535
- width	775	1299	1071	462
- height	665	629	1070	235

Continuation of table 1

Indicator \ Compressor type	ПК-35	ЭК-7Б	ЭК-7В	ЭК-4
Rolling stock type	DL	ERS	ERS	MC
Productivity, м³/min	3,5	0,62	0,58	0,43
Number of revolutions, rpm	1450	560	540	320
Power consumption, kW	32	5,0	4,7	4,3
Discharge pressure, MPa	0,9	0,8	0,8	0,8
Number of compression stages	2	1	1	1
Weight of the compressor, kg	380	118	118	140
Cylinder position	V	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Overall dimensions, mm - length - width - height	 685 860 968	 520 604 440	 520 604 440	 520 583 465

Continuation of table 1

Indicator \ Compressor type	ВГ-0,42/8-400	ЭК4Б-М	К-1	К-2
Rolling stock type	MC	MC	DL, EL	EL
Productivity, м³/min	0,42	0,42	2,0	2,63
Number of revolutions, rpm	400	400	700	720
Power consumption, kW	-	4,5	17,6	18,7
Discharge pressure, MPa	0,8	0,8	0,8	0,9
Number of compression stages	1	1	2	2
Weight of the compressor, kg	130	310	220	360
Cylinder position	Horizontal	Horizontal	V	W
Overall dimensions, mm - length - width - height	 605 627 500	 1028 674 500	 600 860 667	 1043 867 911

indicators and high levels of vibrations, which have a negative impact on people, as well as the reliability and durability of both the compressors themselves and the supporting elements of the rolling stock. Therefore, a rational direction for ensuring the required operational characteristics of air supply systems of modern rolling stock is to eliminate the indicated disadvantages of piston compressors by using rotary compressors (screw, single-rotor vane, trochoidal, etc.). The main advantages of rotary compressors include reduced vibration levels compared to piston compressors, reduced power consumption and mass-dimensional indicators.

Conclusions. The developed classification of positive displacement compressors for railway rolling stock systematizes existing types according to key design and functional features, which simplifies their selection and application. The main classification criteria are determined, including the principle of operation (piston, screw, plate, scroll), number of compression stages, type of drive, cooling method, and features of application on various types of rolling stock.

It was found that piston compressors remain the most common due to their versatility and ability to provide high pressure but have a higher level of vibration and require more frequent maintenance. At the same time, rotary compressors demonstrate better energy efficiency and lower noise levels compared to piston compressors, which makes them promise for modern rolling stock.

The classification of compressors presented in the article allows you to structure them by purpose (braking systems, pneumatic drives, auxiliary systems), which further allows you to more accurately select equipment considering the specific requirements of each system. It can serve as the basis for further scientific research aimed at optimizing the design and increasing the efficiency of compressor units for railway transport.

Bibliography:

1. Anderson R., Thompson M. A novel approach to classifying reciprocating compressors in diesel-electric locomotives based on vibration signatures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 187. 109932.
2. Petrova E., Volkov K. Thermodynamic analysis of screw compressors for high-speed train pneumatic systems. *Applied Energy*. 2023. Vol. 331, 120389.
3. Singh P., Kumar R. Failure mode analysis of railway air brake compressors using Weibull distribution. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 138. 106324.
4. Feng Y., Zhang G. Design optimization of twin-screw compressors for energy-efficient metro trains. *Energy*. 2021. Vol. 225. 120245.
5. González A., Ruiz, D. Comparative study of lubricated vs. oil-free compressors in urban rail vehicles. *Tribology International*. 2020. Vol. 151. 106501.
6. Watanabe T., Kobayashi H. AI-based predictive maintenance of piston compressors in freight trains. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. 23456–23468.
7. Martins L., Silva F. Acoustic emission monitoring for fault detection in railway scroll compressors. *Journal of Sound and Vibration*. 2023. Vol. 544. 117355.
8. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28–34.
9. Fomin O., Lovska A., Kulbovskyi I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologie*. 2019. № 2/7 (98). P. 6–12.
10. Chen H., Wang L. Energy recovery from waste heat in railway compressor systems: A techno-economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 158. 112156.
11. Bertoni M., Fumagalli L. Lifecycle cost analysis of different compressor types in regional trains. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021. Vol. 99. 102998.
12. Kim S., Lee Y. Experimental study on the performance of variable-speed compressors in hybrid rail vehicles. *International Journal of Refrigeration*. 2020. Vol. 118. P. 432–441.
13. Al-Mansoori S., Al-Hassani A. CFD simulation of airflow in reciprocating compressors for high-speed trains. *Computers & Fluids*. 2023. Vol. 250. 105707.
14. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 5. P. 79–87.
15. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies.* 2018. № 2/1(92). P. 63–71.
16. Popov V., Ivanova T. Digitalization of maintenance processes for railway compressors using IoT. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. Vol. 28. 100365.
17. Schröder J., Weber M. Noise and vibration control in railway piston compressors: A case study. *Noise & Vibration Worldwide*. 2021. 52(4). P. 123–135.
18. Zhao W., Liu B. A review of sealing technologies for rotary compressors in rail applications. *Tribology Transactions*. 2020. Vol. 63. Issue 6. P. 789–801.
19. Ricci M., Moretti L. Sustainable materials for lightweight compressors in next-gen rail transport. *Sustainable materials and technologies*. 2024. Vol. 39. e00845.

Фомін О.В., Логвіненко О.А., Кузьменко С.В., Заверкін А.В. КЛАСИФІКАЦІЯ КОМПРЕСОРІВ ОБ'ЄМНОЇ ДІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

У статті розглянуто класифікацію компресорів об'ємної дії, які широко використовуються в пневматичних системах тягового та моторвагонного рухомого складу. Проведено аналіз сучасних технічних рішень у галузі компресоробудування, а також чинних класифікацій, що використовуються в науковій та виробничій літературі. Основну увагу приділено систематизації компресорів залежно від конструктивних ознак, режиму роботи, кількості ступенів стискання, типу приводу, наявності мастила, а також сфери застосування (*локомотиви, електропоїзди, дизель-поїзди, вагони метрополітену тощо*).

Сформульовано необхідність побудови узагальненої класифікаційної схеми, яка враховує як традиційні, так і новітні технічні рішення, що застосовуються у сучасному залізничному транспорті. Розроблено багаторівневу структуру класифікації компресорів об'ємної дії, що охоплює їх основні типи – поршневі, мембранні, гвинтові та інші, з детальним розглядом конструктивних та експлуатаційних

характеристик кожного з них. Визначено переваги й недоліки різних типів компресорів з огляду на умови їх експлуатації, ремонтопридатність, енергоефективність та вартість обслуговування.

У ході дослідження враховано дані з технічної документації та каталогів провідних виробників компресорного обладнання, таких як ОАО «Полтавський турбомеханічний завод», ВАТ «Транспневматика», Atlas Copco, CKD та ін. Проаналізовано перспективи застосування сучасних енергозберігаючих технологій у компресорних установках, зокрема інверторного регулювання продуктивності та безмасляних систем. Зроблено висновки щодо доцільності впровадження єдиної класифікаційної системи у нормативно-технічну базу для полегшення вибору компресорного обладнання на етапах проектування та експлуатації рухомого складу.

Зазначено, що результати дослідження можуть бути використані в практиці інженерного проектування, технічного обслуговування, модернізації пневматичних систем рухомого складу та слугувати основою для подальших наукових досліджень, спрямованих на оптимізацію конструкції та підвищення ефективності компресорних установок для залізничного транспорту.

Ключові слова: *перевезення, механіка, залізничний транспорт, транспортні технології, рухомий склад, ремонт, експлуатація, надійність, компресори.*

УДК 629.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/53

Черненко П.В.
Національна академія Національної гвардії України

Фисун В.В.
Національна академія Національної гвардії України

Просвєт Ю.Д.
Національна академія Національної гвардії України

АВТОМОБІЛІ MAN TGS НА ШАСІ 4×4 ТА 6×6 В СУЧАСНІЙ ВІЙНІ, ЇХ ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ

Стаття присвячена розгляду технічних характеристик, бойових можливостей, особливостям обслуговування та ремонту автомобілів MAN TGS з конфігураціями шасі 4×4 та 6×6, що широко використовуються в Національній гвардії України. Особлива увага приділена технічному обслуговуванню та ремонту MAN TGS у польових умовах під час ведення бойових дій, включаючи аналіз світового досвіду та перспектив вдосконалення системи технічного забезпечення. Запропоновано рекомендації щодо оптимізації експлуатації MAN TGS у військових підрозділах.

Доведено, що у бойових умовах ремонт MAN TGS потребує спеціалізованих підходів, таких як профілактичне технічне обслуговування, польові ремонтні комплекси та швидка евакуація пошкоджених машин. Аналіз ремонтно-відновлювальних можливостей показав, що оптимізація технічного обслуговування та вдосконалення логістики можуть значно підвищити ефективність використання MAN TGS у військових підрозділах.

Проаналізовано світовий досвід ремонту вантажівок MAN TGS, де: Німеччина використовує оригінальні деталі та цифрову діагностику для забезпечення високої якості обслуговування;

США користується модульною заміною вузлів, що дозволяє швидко проводити ремонтні роботи, мінімізуючи час простою техніки;

Польща за допомогою мобільних ремонтних бригад забезпечує оперативне обслуговування військової техніки безпосередньо в місцях дислокації.

Перспективами вдосконалення системи ремонту є впровадження електронних журналів обліку несправностей, це дозволить систематизувати дані про поломки та ефективніше планувати ремонтні роботи. Закупівля оригінальних запчастин через офіційні канали забезпечить довговічність та надійність відремонтованої техніки. Покращення підготовки механіків через навчальні програми та регулярне підвищення кваліфікації персоналу сприятиме якісному та швидкому обслуговуванню вантажівок. Застосування цих заходів сприятиме підвищенню ефективності та надійності експлуатації вантажівок MAN TGS у підрозділах НГУ.

Отримані результати підтверджують, що оновлення автопарку НГУ за рахунок MAN TGS значно підвищить мобільність, бойову ефективність і логістичні можливості військових підрозділів.

Ключові слова: *Національна гвардія України, автомобілі MAN TGS, технічне обслуговування, ремонт, ремонтно-відновлювальні органи, основні технічні характеристики.*

Постановка проблеми. Автомобілі MAN TGS широко використовуються в Національній гвардії України (НГУ) завдяки високій прохідності, надійності та вантажопідйомності. В умовах бойового та спеціального використання важливо підтримувати їх у справному стані, що потребує своєчасного технічного обслуговування та ремонту.

Сучасна війна потребує високої мобільності та ефективності військової техніки. Вантажівки MAN TGS є основним транспортним засобом для логістичних завдань НГУ, зокрема перевезення особового складу, боєприпасів та евакуації пошкодженої техніки. Їх технічне обслуговування та ремонт мають критичне значення для підтримки боєздатності підрозділів.

В умовах сучасних бойових дій роль спеціалізованого військового транспорту, такого як MAN TGS, стає вирішальною. Його експлуатація під час конфліктів впливає на мобільність і логістику військ, тому дослідження на цю тему є важливим для з'ясування ефективності та можливостей сучасної техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автомобілі MAN TGS з конфігураціями шасі 4×4 та 6×6 є сучасними повнопривідними вантажівками, розробленими для роботи в складних умовах бездоріжжя та важкопрохідної місцевості [1]. Ці моделі широко використовуються в будівництві, лісовому господарстві, військових операціях та інших сферах, де потрібна висока прохідність і надійність.

У 2007 році як частина нової лінійки вантажівок компанії MAN Truck & Bus AG. Ця серія прийшла на зміну попередній моделі TGA, пропонуючи покращені технічні характеристики та більшу універсальність для різних сфер застосування [2].

Моделі MAN TGS з конфігураціями шасі 4×4 та 6×6 були розроблені спеціально для роботи в складних умовах, таких як будівництво, лісове господарство та військові операції.

Ці повнопривідні версії забезпечують високу прохідність та надійність на бездоріжжі, що робить їх ідеальними для використання в умовах, де стандартні вантажівки не справляються.

Постановка завдання. Метою статті є визначення ключових характеристик MAN TGS та його переваги в бойових умовах, порівняти експлуатаційні показники MAN TGS та радянських аналогів, проаналізувати вплив цих транспортних засобів на військову тактику та стратегію, аналіз процесу ремонту та технічного обслуговування MAN TGS у підрозділах НГУ, визначення основних несправностей і методів їх усунення, а також розгляд світового досвіду в обслуговуванні подібної техніки, запропонувати рекомендації щодо оптимізації використання MAN TGS у сучасних конфліктах.

Виклад основного матеріалу. Автомобіль MAN TGS (Trucknology Generation Series) був представлений у 2010 році, після створення спільного підприємства Rheinmetall MAN Military Vehicles (RMMV), були представлені військові модифікації MAN TGS. Ці версії отримали додаткове бронювання, посилену підвіску та інші спеціалізовані компоненти, адаптовані для військових потреб. Військові моделі MAN TGS 4×4 та 6×6 активно використовуються в арміях різних країн для транспортування вантажів, особового складу та спеціального обладнання.

З моменту свого запуску MAN TGS зарекомендував себе як надійний та універсальний автомобіль, здатний виконувати широкий спектр завдань у найскладніших умовах експлуатації.

Радянські вантажівки, такі як КамАЗ, Урал та ЗІЛ, довгий час були основою військової логістики на пострадянському просторі. Вони використовувалися для транспортування особового складу, озброєння та вантажів у бойових умовах. Нижче наведено загальний огляд цих автомобілів та їх технічних характеристик для порівняння з сучасними моделями, такими як MAN TGS [3].

Основні технічні характеристики радянських аналогів:

1. КамАЗ-4310

Двигун: V-подібний 8-циліндровий дизельний двигун об'ємом 10,85 л, потужністю 210 к.с.

Вантажопідйомність: 6 тон.

Паливна економічність: витрата пального становить приблизно 30 л/100 км.

Маневреність: колісна формула 6×6 забезпечує хорошу прохідність на бездоріжжі.

2. Урал-4320

Двигун: V-подібний 8-циліндровий дизельний двигун об'ємом 11,15 л, потужністю 240 к.с.

Вантажопідйомність: 5 тон.

Паливна економічність: витрата пального близько 35 л/100 км.

Маневреність: колісна формула 6×6, висока прохідність у складних умовах

3. ЗІЛ-131

Двигун: V-подібний 8-циліндровий бензиновий двигун об'ємом 6,0 л, потужністю 150 к.с.

Вантажопідйомність: 3,5 тони.

Паливна економічність: витрата пального близько 40 л/100 км.

Маневреність: колісна формула 6×6, добра прохідність, але менша економічність через бензиновий двигун.

Основні технічні характеристики MAN TGS:

Двигун: дизельний двигун потужністю від 320 до 540 кінських сил в залежності від моделі [2].

Максимальна вантажопідйомність: до 18 тон в залежності від модифікації.

Система приводу: як стандарт, MAN TGS оснащується 6×6, або 4×4 приводами, що забезпечує високі показники прохідності в складних умовах (пустелі, гори, болотисті місцевості).

Швидкість: максимальна швидкість до 90 км/год, що є оптимальним для військових операцій.

Система управління та технології: сучасні системи навігації, GPS, інтеграція з тактичними мережами та радіозв'язком для підвищення ефективності на полі бою.

Екологічні стандарти: знижені викиди CO_2 та відповідає екологічним стандартам Євро-6, що важливо для використання в умовах бойових дій на довгій дистанції.

Ці характеристики дозволяють MAN TGS бути вельми ефективним у виконанні бойових та логістичних завдань. Вантажівка має високу маневреність і може працювати в умовах, де традиційні цивільні транспортні засоби можуть зазнати невдачі.

Вантажівки MAN TGS [4] з конфігураціями 4×4 та 6×6 відрізняються, зокрема, кількістю ведучих мостів: модель 6×6 має три ведучі мости, що підвищує її прохідність на бездоріжжі [4].

MAN D15 (9.0 л):

– легший двигун із меншою витратою пального;

– підходить для середньотоннажних вантажівок і регіональних перевезень;

– менші експлуатаційні витрати;

– оптимальний для умов, де не потрібна максимальна тяга.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики MAN TGS і радянських аналогів

Характеристики	КамАЗ-4310	Урал-4320	ЗІЛ-131	MAN TGS
Двигун	210 к.с.	240 к.с.	150 к.с.	480 к.с.
Вантажопідйомність	6 т	5 т	3,5 т	21 т
Витрата пального	30 л/100 км	35 л/100 км	40 л/100 км	25 л/100 км
Прохідність	Висока	Висока	Середня	Дуже висока
Ремонтопридатність	Середня	Висока	Висока	Середня
Підготовка до руху	Швидка	Швидка	Швидка	Швидка
Екстремальні умови	Добре	Відмінно	Добре	Відмінно

Таблиця 2

Порівняльні характеристики MAN TGS 4×4 і MAN TGS 6×6

Характеристика	MAN TGS 4×4	MAN TGS 6×6
Тип приводу	Повний (2 мости)	Повний (3 мости)
Потужність двигуна	320–540 к.с.	360–540 к.с.
Коробка передач	Автоматична/механічна	Автоматична/механічна
Вантажопідйомність	10–18 т	15–25 т
Прохідність	Висока	Дуже висока

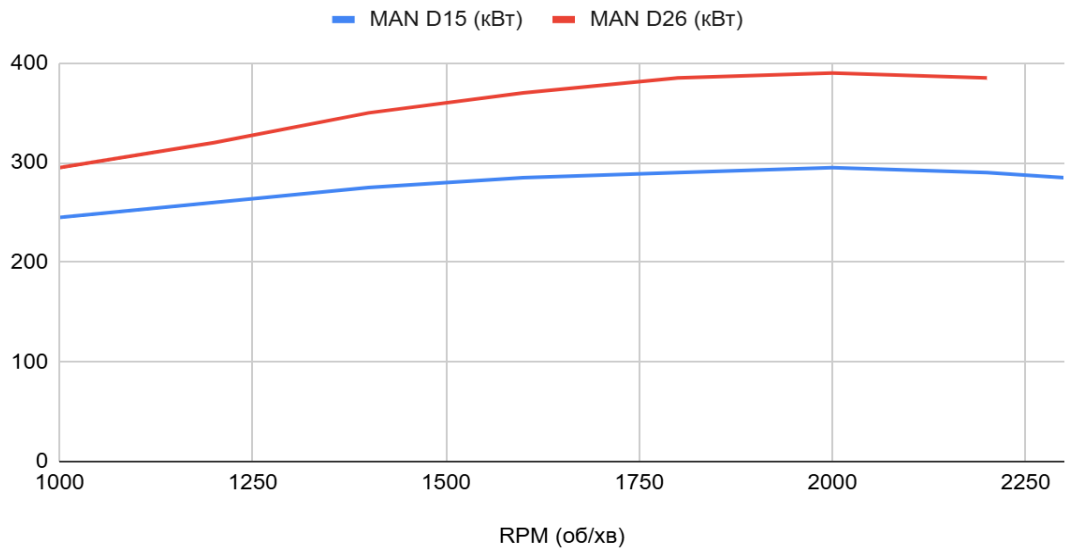


Рис. 1. Гафік потужностей і порівняння двигунів D15 та D26

MAN D26 (12.4 л):

– більш потужний і тяговитий, що робить його кращим для магістральних перевезень та важких умов;

– витримує великі навантаження, що підходить для будівельних, військових та далекомагістральних перевезень;

– вища витрата пального, але забезпечує стабільну потужність на високих швидкостях і великих вантажах.

MAN D15 ідеально підходить для економічної експлуатації та вантажівок середньої вантажопідйомності.

MAN D26 – для важких умов і магістральних перевезень, забезпечує кращу тягу та стабільність.

Вибір двигуна залежить від потреб – економія пального чи висока потужність.

Вантажівка MAN TGS є сучасним тактичним транспортним засобом, що має низку переваг для використання в бойових умовах. Завдяки передовим технологіям, потужним двигунам і високій прохідності вона ефективно виконує завдання навіть у найскладніших ситуаціях.

Прохідність:

MAN TGS оснащений повнопривідними системами (4×4, 6×6, 8×8), що дозволяє йому пересуватися по складній місцевості – болотах, гірських районах, пустелях і лісах.

Високий кліренс і спеціалізовані шини забезпечують хорошу стійкість на слизьких та нерівних дорогах.

Автоматична система регулювання тиску в шинах підлаштовується під різні типи покриття.

Маневреність:

Завдяки потужному двигуну MAN D15 (330–400 к.с.), або D26 (430–520 к.с.) машина швидко розганяється та утримує високу швидкість.

Інтелектуальні системи керування приводом дозволяють ефективно маневрувати навіть у міських чи обмежених умовах.

Зменшений радіус розвороту робить машину зручною для пересування у вузьких просторах.

Безпека та захист екіпажу:

Деякі модифікації мають броньований кузов для захисту від стрілецької зброї та осколків.

Посилена кабіна захищає водія та пасажирів у разі підриву на міні, або атаки.

Системи автоматичного пожежогасіння та захисту паливного бака знижують ризик займання під час бою.

Вантажопідйомність і функціональність:

MAN TGS здатний перевозити до 30 тон вантажу, що дозволяє транспортувати боєприпаси, пальне та військове обладнання.

Оснащений спеціальними контейнерними системами та платформами для транспортування військової техніки.

Можливість встановлення модулів для перевезення особового складу, або польових госпіталів.

Інтеграція з сучасними технологіями:

GPS-навігація, бортові комп'ютери та системи моніторингу стану техніки допомагають екіпажу ефективно управляти транспортним засобом у режимі реального часу.

Інтеграція з системами зв'язку забезпечує координацію підрозділів у бойових умовах.

Деякі модифікації можуть працювати у складі автономних колон із дистанційним керуванням.

Економічність та витривалість:

Відповідність екологічним стандартам Euro 6 знижує витрати пального та викиди CO_2.

Висока надійність двигунів дозволяє мінімізувати частоту обслуговування, що критично важливо в бойових умовах.

Покращені паливні системи дають можливість працювати на низькоякісному паливі, що часто зустрічається в зонах конфлікту.

Технічне обслуговування та ремонт вантажівок MAN TGS в бойових умовах.

Основні аспекти ремонту та обслуговування:

Профілактичне технічне обслуговування (ТО)

Щоб запобігти поломкам у критичних ситуаціях, важливо дотримуватися регулярного ТО:

– перевірка рівня масла та охолоджувальної рідини;

– контроль стану паливної системи (фільтри, шланги, герметичність);

– огляд гальмівної системи (колодки, гальмівні магістралі);

– перевірка підвіски та кріплення коліс;

– оцінка стану акумуляторів та електропроводки.

Польовий ремонт двигуна та трансмісії [5]:

– для швидкої заміни масла та фільтрів слід мати запасні матеріали та насос для відкачки;

– у разі перегріву двигуна – огляд патрубків та радіатора, промивання системи охолодження;

– при збоях у паливній системі – перевірка ТНВД, заміна паливного фільтра, продувка паливних магістралей;

– при проблемах із коробкою передач – перевірка рівня та стану масла, діагностика зчеплення.

Ремонт ходової частини та підвіски:

– посилене навантаження на ресори та амортизатори вимагає їх регулярного огляду;

– перевірка зносу шин та стану дисків, особливо після руху по бездоріжжю;

– ремонт або заміна втулок, сайлентблоків та стабілізаторів.

Робота з електрообладнанням:

– захист електропроводки від вологи та механічних пошкоджень;

– оперативний ремонт фар, покажчиків поворотів, бортового комп'ютера;

– перевірка системи запуску двигуна – стартер, генератор, акумулятор.

Специфіка ремонту в бойових умовах:

– використання польового інструменту та мобільних ремонтних комплексів;

– наявність запасних вузлів та деталей у мобільних складах;

– швидка евакуація пошкоджених вантажівок для ремонту в тилу;

– захист радіаторів, паливних баків і критичних вузлів від бойових пошкоджень.

У разі серйозних ушкоджень (розриви рами, критичні пошкодження двигуна) проводиться евакуація на ремонтну базу.

Висновки. Автомобілі MAN TGS 4×4 та 6×6 відіграють ключову роль у забезпеченні мобільності та логістики Національної гвардії України. Вони мають значні переваги перед радянськими аналогами завдяки потужним двигунам, підвищеній вантажопідйомності, сучасним технологіям та високій прохідності. У бойових умовах MAN TGS демонструє відмінну маневреність, надійність і здатність працювати у складних умовах бездоріжжя.

Технічне обслуговування та ремонт цих вантажівок є критично важливими для підтримки боєздатності підрозділів. Світовий досвід показує, що використання оригінальних деталей, цифрової діагностики та мобільних ремонтних бригад значно покращує ефективність експлуатації техніки.

У бойових умовах ремонт MAN TGS потребує спеціалізованих підходів, таких як профілактичне технічне обслуговування, польові ремонтні комплекси та швидка евакуація пошкоджених машин. Аналіз ремонтно-відновлювальних можливостей показав, що оптимізація технічного обслуговування та вдосконалення логістики можуть значно підвищити ефективність використання MAN TGS у військових підрозділах.

Рекомендації щодо вдосконалення обслуговування MAN TGS включають впровадження електронних журналів несправностей, закупівлю оригінальних запчастин, підвищення кваліфікації механіків та покращення організації ремонтних робіт у бойових умовах. Це дозволить підвищити експлуатаційну надійність вантажівок та знизити витрати на їх утримання.

Загалом, MAN TGS є сучасним і високоефективним транспортним засобом, який значно покращує мобільність військових підрозділів та забезпечує їхню оперативну готовність у складних бойових умовах.

Список літератури:

1. Огляд повнопривідного лісовозу MAN TGS 6x6 URL:https://chagatay.com.ua/obzor-polnoprivodnogo-lesovoza-man-tgs6x6.html?srsltid=AfmBOooXzfjQLmvQUUpXM_R3U3etREMvIiwmpGozk8ym9wAATAIneLT.

2. RMMV TG MIL range of trucks URL:https://en.wikipedia.org/wiki/RMMV_TG_MIL_range_of_trucks.

3. Крайник Л.В., Грубель М.Г. Напрями розвитку середньотоннажних автомобілів URL: https://surl.li/nfwfse

4. MAN TGS – надійний універсал з гарантією ефективності URL: https://mantruck.com.ua/truck/man-tgs/?utm_source=chatgpt.com.

5. Несправності двигуна вантажних автомобілів MAN та можливі причини URL: https://surl.li/svpfsd

Chernenko P.V., Fysun V.V., Prosvet Yu.D. MAN TGS CARS ON CHASSIS 4×4 AND 6×6 IN MODERN WAR, THEIR MAINTENANCE AND REPAIR

The article is devoted to the consideration of technical characteristics, combat capabilities, features of maintenance and repair of MAN TGS cars with chassis configurations 4×4 and 6×6, which are widely used in the National Guard of Ukraine. Particular attention is paid to the maintenance and repair of MAN TGS in the field during the conduct of hostilities, including the analysis of world experience and prospects for improving the technical support system. Recommendations for optimizing the operation of MAN TGS in military units are proposed.

It is proved that in combat conditions, MAN TGS repair requires specialized approaches, such as preventive maintenance, field repair complexes and quick evacuation of damaged vehicles. Analysis of repair and recovery

capabilities has shown that optimizing maintenance and improving logistics can significantly improve the efficiency of using MAN TGS in military units.

The world experience of repair of MAN TGS trucks is analyzed, where: Germany uses original parts and digital diagnostics to ensure high quality of service;

The USA uses a modular replacement of units, which allows for quick repair work, minimizing downtime;

Poland with the help of mobile repair teams provides operational maintenance of military equipment directly in places of deployment.

Prospects for improving the repair system are the introduction of electronic fault logs, this will systematize data on breakdowns and more effectively plan repair work. The purchase of original spare parts through official channels will ensure the durability and reliability of the repaired equipment. Improved training of mechanics through training programs and regular staff development will contribute to high-quality and fast maintenance of trucks. The application of these measures will contribute to improving the efficiency and reliability of operation of MAN TGS trucks in NSU units.

The results confirm that the renewal of the NSU fleet due to MAN TGS will significantly increase the mobility, combat effectiveness and logistics capabilities of military units.

Key words: *National Guard of Ukraine, MAN TGS cars, maintenance, repair, repair and restoration bodies, basic technical characteristics.*

УДК 656.025.4:004.896:614.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/54

Чижик В.М.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Швець М.Д.
Національний університет водного господарства та природокористування

Іваненко Р.О.
Український науково-дослідний інститут спеціальної
техніки та судових експертиз

ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ЛОГІСТИКИ ГУМАНІТАРНОЇ ДОПОМОГИ ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю підвищення ефективності логістичних систем гуманітарної допомоги в кризових умовах шляхом інтеграції безпілотних технологій, здатних забезпечити оперативність і безпеку доставлення ресурсів у важкодоступні регіони. В умовах руйнування транспортної інфраструктури та нестабільності комунікацій безпілотні системи можуть стати критично важливим інструментом для оптимізації логістичних процесів.

Мета статті – обґрунтувати наукові підходи до впровадження безпілотних технологій у логістичні системи гуманітарної допомоги з акцентом на забезпечення своєчасного доставлення вантажів та мінімізацію ризиків для персоналу в кризових ситуаціях.

Методологія дослідження базується на системному аналізі, що охоплює оцінювання технічних можливостей безпілотних платформ, аналіз правових та інфраструктурних обмежень, а також виявлення ключових проблем інтеграції безпілотних систем у логістичні операції гуманітарної допомоги. Використано методи порівняльного аналізу, узагальнення міжнародного досвіду та статистичного аналізу цифрової готовності регіонів.

Результати дослідження. Встановлено, що використання безпілотних систем у гуманітарній логістиці дозволяє скоротити час доставлення до 30–40% порівняно з традиційними методами транспортування. Виявлено, що основними проблемами інтеграції є обмеженість цифрової інфраструктури в регіонах із низьким рівнем цифрової готовності, нестабільний зв'язок та відсутність нормативної бази для польотів дронів у кризових умовах. Доведено доцільність створення мобільних хабів для підтримки безпілотних систем, які включають зарядні станції, технічне обслуговування та резервні комунікаційні канали.

Висновки. Доведено, що впровадження безпілотних технологій у логістиці гуманітарної допомоги є перспективним напрямом, здатним суттєво підвищити швидкість доставлення вантажів та зменшити ризики для персоналу. Визначено, що ефективність таких систем залежить від рівня цифрової готовності регіонів, наявності нормативно-правової бази для кризових польотів та технічної адаптації платформ до складних умов.

Перспективи подальших досліджень включають розроблення моделей адаптивної логістики з використанням автономних безпілотних платформ та системи моніторингу ризиків для оптимізації доставлення гуманітарних вантажів у кризових регіонах.

Ключові слова: *дрони, автономні платформи, кризові ситуації, доставлення вантажів, цифрова інфраструктура, оптимізація логістики, ризики впровадження.*

Постановка проблеми. Використання безпілотних технологій у системах логістики гуманітарної допомоги під час надзвичайних ситуацій стає все більш актуальним у сучасних умовах зростання природних катастроф, воєнних конфліктів та інших надзвичайних подій. Традиційні методи логістичного забезпечення часто стикаються з труднощами, пов'язаними з транспортною інфраструктурою, ризиками для життя рятувальників та персоналу, а також складністю організації оперативного доступу до віддалених або небезпечних зон. Такі виклики зумовлюють

необхідність упровадження нових технологічних рішень, які здатні забезпечити ефективність і швидкість логістичних операцій навіть в екстремальних умовах.

Застосування безпілотних літальних апаратів та автономних наземних транспортних засобів у логістиці гуманітарної допомоги дозволяє долати обмеження традиційних підходів. Безпілотники можуть доставляти необхідні ресурси в зони з обмеженим доступом, здійснювати моніторинг ситуації та передавати важливу інформацію в реальному часі. Автономні наземні транспортні засоби дають змогу безпечного переміщення вантажів через небезпечні території без ризику для людського життя. Використання таких технологій сприяє підвищенню ефективності розподілу ресурсів, зменшенню часу доставлення та оптимізації процесу прийняття рішень в умовах надзвичайної ситуації.

Проблематика дослідження полягає у визначенні оптимальних шляхів інтеграції безпілотних технологій у логістичні системи гуманітарної допомоги, зокрема в аспектах швидкості доставлення, точності визначення потреб, безпеки транспортних операцій та адаптації до непередбачуваних умов. Розв'язання цієї проблеми має значне практичне та наукове значення, оскільки сприяє розробленню моделей організації логістики, здатних оперативно реагувати на зміну ситуації.

Наукові завдання включають аналіз сучасних технологій безпілотного транспорту, вивчення міжнародного досвіду їх використання в умовах криз, оцінювання ефективності впровадження в різних логістичних сценаріях та формування рекомендацій щодо подальшого вдосконалення систем управління гуманітарною допомогою з урахуванням ризиків та обмежень. Важливим аспектом є також розроблення методології оцінювання ефективності інтеграції безпілотних рішень у логістичні ланцюги, що дозволить забезпечити високий рівень оперативності та безпеки в умовах надзвичайних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень з використання безпілотних технологій у системах логістики гуманітарної допомоги під час надзвичайних ситуацій свідчить про наявність чотирьох основних змістових напрямів.

Перший напрям присвячено використанню безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для гуманітарної допомоги. В. Воронько та І. Воронько [1] досліджують основні області застосування БПЛА в гуманітарній логістиці, зокрема для доставлення медикаментів, продовольства та проведення розвідування в зонах стихійних лих і конфліктів. Е. Плачек (E. Płaczek) та А. Світальська (A. Świtalska) [2] аналізують новітні технології, включаючи дрони, для швидкого реагування в кризових ситуаціях. Застосування дронів під час природних катастроф досліджують М. Естрада (M. Estrada), А. Ндома (A. Ndoma) [3], підкреслюючи значення швидкого доставлення вантажів. М. Азмат (M. Azmat), С. Куммер (S. Kummer) [4] розглядають потенціал безпілотних транспортних засобів для подолання логістичних викликів, включаючи транспорт у важкодоступні регіони. Перспективним є подальше дослідження інтеграції дронів у системи логістики для забезпечення безперервності постачань у важкодоступних районах.

Другий напрям наукових праць зосереджено на використанні роботизованих систем і штучного інтелекту у військовій логістиці. В. Коваль, О. Семененко, С. Баранов, С. Островський, Т. Акініна, О. Сєченев [5] аналізують теоретичні аспекти застосування роботизованих систем у збройних конфліктах, акцентуючи увагу на автоматизації процесів управління ресурсами. Можливості штучного інтелекту для забезпечення логістичної підтримки бойових дій досліджує А. О. Гриндей [6]. Р. Курпієвська-Корбут (R. Kurpiewska-Korbut) [7] розглядає цифрові технології в глобальному гуманітарному секторі, зокрема аналізує досвід України у використанні дронів під час війни. Перспективним є розширення досліджень щодо інтеграції штучного інтелекту в логістичні системи для забезпечення автономного управління доставленням ресурсів.

Третій напрям стосується інтеграції нових технологій у гуманітарну логістику. Т. Гуцул (T. Hutsul), М. Хобзей (M. Khobzei), В. Ткач (V. Tkach), О. Круліковський (O. Krulikovskyi), О. Мойсюк (O. Moisiuk), В. Івашко (V. Ivashko), А. Саміла (A. Samila) [8] досліджують роль дронів у гуманітарному розмінуванні на території України. Д. Едвардс (D. Edwards), Н. Субраманян (N. Subramanian), А. Чаудхурі (A. Chaudhuri), П. Морлаччі (P. Morlacchi), В. Чженг (W. Zeng) [9] зосередились на бар'єрах прийняття безпілотних технологій з боку логістичних провайдерів, підкреслюючи необхідність розроблення нових стандартів безпеки польотів. Технічні обмеження, що заважають широкомасштабному впровадженню дронів у логістику гуманітарної допомоги, аналізують А. Камат

(A. Kamat), С. Шанкер (S. Shanker), А. Барве (A. Barve), К. Мудулі (K. Muduli), С. К. Мангла (S. K. Mangla), С. Лутра (S. Luthra) [10]. С. Сотудегфар (S. Sotoudehfar), Й. Саркін (J. J. Sarkin) [11] аналізують застосування дронів у російсько-українському конфлікті щодо порушення міжнародного гуманітарного права. Своєю чергою В. Целлєр, С. Крамський [12] розглядають інфраструктурну підтримку інновацій у сфері транспортної логістики. Перспективним є подальше дослідження можливостей інтеграції автоматизованих систем контролю за переміщенням гуманітарних вантажів.

Четвертий напрям досліджень присвячено проблемам та викликам використання дронів у гуманітарній логістиці. Сучасні підходи до використання дронів для гуманітарної допомоги систематизують Р. Е. Альфаріс (R. E. Alfaris), З. Вафахаг (Z. Vafakhah), М. Джалаєр (M. Jalayer) [13], виявляючи ключові проблеми реалізації проєктів у кризових умовах. А. Реджеб (A. Rejeb), К. Реджеб (K. Rejeb), С. Сімске (S. Simske), Г. Тріблмаєр (H. Treiblmaier) [14] аналізують можливості застосування дронів у гуманітарних операціях та окреслюють основні бар'єри для їх масштабного впровадження. Перспективним є вивчення методів оптимізації управління дронами з огляду на специфіку роботи в кризових умовах.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про значну увагу науковців до використання безпілотних технологій у системах логістики гуманітарної допомоги.

Попри все більшу увагу до впровадження безпілотних технологій у логістику гуманітарної допомоги, залишаються нерозв'язаними питання оптимізації їх використання в кризових регіонах з обмеженою цифровою інфраструктурою та нестабільним зв'язком. Не досить досліджено аспекти адаптації безпілотних систем до умов руйнування транспортних шляхів, що знижує ефективність доставлення гуманітарних вантажів у зони активних бойових дій або природних катастроф. Відсутні комплексні критерії оцінювання ефективності дронів з урахуванням специфіки регіонів, що обмежує можливість точного планування маршрутів доставлення. Також недостатньо уваги приділено нормативно-правовому забезпеченню польотів безпілотників у зонах надзвичайних ситуацій, що ускладнює координацію між гуманітарними службами та операторами дронів.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення цих прогалин шляхом системного аналізу логістичних процесів у кризових регіонах з акцентом на адаптацію безпілотних систем до умов зруйнованої інфраструктури та нестабільних комунікацій. Установлення критеріїв оцінювання ефективності дронів, що враховують швидкість доставлення, безпеку та ресурсозбереження, дозволить розробити практичні рекомендації щодо оптимізації маршрутів та організації логістичних операцій з огляду на обмеження, притаманні кризовим зонам. Зокрема, акцент зроблено на доцільності впровадження мобільних хабів для запуску дронів та використання дронів-ретрансляторів для забезпечення зв'язку в зонах з обмеженим доступом до телекомунікаційної інфраструктури.

Постановка завдання. Мета статті – обґрунтувати наукові підходи до інтеграції безпілотних технологій у логістичні системи гуманітарної допомоги з метою підвищення оперативності та безпеки доставлення ресурсів під час надзвичайних ситуацій.

Завдання статті:

1) визначити цільові напрями застосування безпілотних технологій у логістичних процесах гуманітарної допомоги з акцентом на забезпечення оперативності доставлення вантажів у кризових умовах;

2) оцінити вплив інтеграції безпілотних систем на ефективність управління логістичними операціями, зокрема щодо координації ресурсів та забезпечення стабільного зв'язку між підрозділами в зонах зі зруйнованою інфраструктурою;

3) виявити ключові проблеми впровадження безпілотних технологій у гуманітарну логістику, зокрема технічні та правові обмеження, та розробити практичні рекомендації щодо їх подолання для оптимізації логістичних процесів у кризових регіонах.

Виклад основного матеріалу. Використання безпілотних технологій у логістиці гуманітарної допомоги сприяє ефективній організації доставлення ресурсів у кризових ситуаціях, коли традиційні методи транспортування стають недоступними або небезпечними. Такі технології охоплюють широкий спектр завдань, починаючи від моніторингу територій та збору даних до транспортування вантажів та підтримки комунікацій. Основні напрями застосування безпілотних систем у логістиці гуманітарної допомоги включають доставлення вантажів, пошук і порятунок людей, моніторинг небезпечних зон, комунікаційну підтримку та збір аналітичних даних для прогнозування ризиків. Ці напрями

реалізуються завдяки використанню безпілотних літальних апаратів, автономних наземних транспортних засобів та роботизованих платформ, що дозволяє швидко реагувати на зміни в ситуації та забезпечувати координацію між рятувальними службами (табл. 1).

Застосування безпілотних технологій у логістичних системах гуманітарної допомоги в сучасних умовах є особливо актуальним у регіонах з ускладненим доступом до інфраструктури. У країнах Європи, як-от Німеччина і Португалія, дрони активно використовуються для моніторингу територій після паводків та лісових пожеж. Це дозволяє оперативно отримувати актуальну інформацію про масштаби руйнувань та ефективно координувати рятувальні операції [9]. Аналогічно у Швейцарії було розроблено систему автономних дронів для доставлення медичних препаратів до віддалених гірських районів, де традиційний транспорт є небезпечним або малоефективним [2].

В Україні застосування безпілотних технологій отримало новий імпульс у зв'язку з війною. У прифронтових зонах дрони використовуються для моніторингу інфраструктури, виявлення пошкоджених об'єктів та доставлення гуманітарних вантажів у місцевості, що залишаються відрізаними від основних транспортних шляхів [1]. Впровадження таких технологій дозволяє значно скоротити час доставлення, зменшити ризики для волонтерів та забезпечити зворотний зв'язок із кризовими зонами.

Практичний ефект від використання безпілотних систем у логістиці гуманітарної допомоги також проявляється в зниженні витрат на транспортування, оскільки безпілотні платформи часто є менш ресурсозатратними, ніж традиційні транспортні засоби. Водночас успішна реалізація подібних проєктів потребує системного підходу до планування, що включає підготовку операторів дронів, налагодження ефективних каналів зв'язку та розроблення алгоритмів аналізу зібраних даних. Так, інтеграція безпілотних технологій у логістичні системи гуманітарної допомоги дозволяє не лише підвищити швидкість реагування на кризові ситуації, але й забезпечити збереження життя та здоров'я персоналу, що працює в небезпечних умовах.

Оцінювання ефективності безпілотних систем у логістиці гуманітарної допомоги є важливим етапом для забезпечення оптимальної організації логістичних процесів. В умовах надзвичайних ситуацій такі системи відіграють ключову роль у швидкому доставленні вантажів, моніторингу ситуації, підтримці комунікацій та зборі даних для аналізу ризиків. Проте для забезпечення максимального ефекту від їх застосування необхідно визначити чіткі критерії оцінювання ефективності безпілотних систем, основними з яких є швидкість виконання завдань, рівень безпеки операцій та здатність до ресурсозбереження. Швидкість забезпечується завдяки можливості оперативного транспортування вантажів, що дуже важливо, якщо традиційні транспортні засоби є недоступними. Безпека передбачає мінімізацію ризиків для персоналу та можливість уникнення небезпечних ділянок із застосуванням безпілотних платформ. Ресурсозбереження

Таблиця 1

Цільові напрями застосування безпілотних технологій у логістиці гуманітарної допомоги в умовах надзвичайних ситуацій

Напрям застосування	Функціональні можливості	Очікуваний ефект
Доставлення гуманітарних вантажів	Транспортування медичних засобів, продуктів харчування та води до віддалених регіонів	Зменшення часу доставлення, мінімізація ризиків для персоналу
Моніторинг та розвідка	Аерофотозйомка територій, оцінка масштабу руйнувань, виявлення небезпечних зон	Оперативний аналіз ситуації, формування плану реагування
Пошук та порятунок	Виявлення потерпілих за допомогою тепловізорів, передача геолокаційних даних	Збільшення швидкості пошукових операцій, підвищення безпеки
Комунікаційна підтримка	Забезпечення зв'язку у випадку руйнування телекомунікаційної інфраструктури	Відновлення координації між службами, оперативна передача інформації
Збір та аналіз даних	Збір інформації про стан територій, моніторинг екологічних умов	Підвищення точності прогнозів, попередження потенційних загроз

Джерело: сформовано на основі [1; 2; 3; 4; 7; 8; 10]

полягає в скороченні витрат на паливо, технічне обслуговування та залучення людських ресурсів (табл. 2).

На практиці оцінювання ефективності безпілотних систем у логістиці гуманітарної допомоги здійснюється на основі аналізу результатів виконаних операцій. В Європейському Союзі проводяться масштабні дослідження щодо впливу безпілотних систем на швидкість реагування у кризових ситуаціях. Наприклад, у Німеччині після паводків 2024 року було використано дрони для доставлення медикаментів до важкодоступних регіонів. Аналіз операцій показав, що середній час доставлення вантажів скоротився на 40% порівняно з традиційними методами транспортування [5]. У Греції після землетрусу дрони-ретранслятори забезпечили безперебійний зв'язок між рятувальними підрозділами, що дозволило оперативно координувати дії та передавати дані про ситуацію в реальному часі [10]. В Україні під час воєнних дій безпілотні системи використовуються для моніторингу небезпечних зон, що дозволяє оцінити ступінь руйнувань та визначити безпечні маршрути для доставлення гуманітарної допомоги. Це сприяє зниженню ризиків для персоналу, який здійснює перевезення вантажів. Водночас ресурсозбереження стає важливим аспектом у кризових умовах, коли доступ до пального та технічних ресурсів обмежений. Застосування безпілотних систем у таких ситуаціях дозволяє оптимізувати витрати на транспортування, оскільки вони не потребують великої кількості пального й технічного обслуговування, як традиційні транспортні засоби.

Інтеграція безпілотних технологій у логістику гуманітарної допомоги тісно пов'язана з рівнем цифрової готовності країн та регіонів. Цифрова готовність включає інфраструктурні, організаційні та технологічні аспекти, які визначають спроможність ефективно впроваджувати інноваційні рішення, зокрема безпілотні системи (табл. 3).

В Європейському Союзі рівень цифрової готовності оцінюється за Індексом цифрової економіки та суспільства (DESI) [15]. Згідно з даними за 2024 рік, країни з високим рівнем цифрової інфраструктури, як-от Данія та Естонія, мають значну частку фіксованих

Таблиця 2

Критерії оцінювання ефективності безпілотних систем у логістиці гуманітарної допомоги

Критерій	Зміст оцінки	Оцінювані показники	Очікуваний ефект
Швидкість виконання	Час, необхідний для доставлення вантажів до місць призначення	Середня швидкість доставлення, час очікування, оперативність реагування	Зменшення часу доставлення, прискорення реагування на кризові ситуації
Безпека операцій	Здатність безпілотних систем виконувати завдання без ризиків для персоналу та вантажів	Кількість аварійних випадків, точність навігації, захист вантажу	Зниження ризиків для персоналу, мінімізація втрат вантажів
Збереження ресурсів	Зменшення витрат на транспортування та обслуговування	Витрати на паливо, кількість залученого персоналу, тривалість автономної роботи	Зниження експлуатаційних витрат, оптимізація логістичних процесів

Джерело: сформовано на основі [6; 9; 10; 14; 15]

Таблиця 3

Взаємозв'язок між рівнем цифрової готовності та ефективністю інтеграції безпілотних технологій у логістиці гуманітарної допомоги

Рівень цифрової готовності	Характеристики цифрової інфраструктури	Потенціал інтеграції безпілотних технологій
Високий	Розвинена широкосмугова мережа, високий рівень цифрових послуг, наявність цифрових платформ для управління логістикою	Високий: ефективне використання дронів для доставлення та моніторингу
Середній	Часткова цифровізація послуг, обмежений доступ до високошвидкісного інтернету, наявність окремих цифрових ініціатив	Середній: потенціал для розширення використання безпілотних технологій

Джерело: сформовано на основі [7; 8; 12; 13]

широкосмугових підключень зі швидкістю понад 1 Гбіт/с, що сприяє ефективному впровадженню безпілотних технологій у логістиці гуманітарної допомоги.

В Україні рівень цифрової готовності регіонів оцінюється за Індексом цифрової трансформації регіонів [16]. У 2024 році середнє значення Індексу по країні становило 0,497 бала. Лідерами стали Львівська (0,850), Дніпропетровська (0,844) та Одеська (0,805) області, які мають розвинену цифрову інфраструктуру та активно впроваджують цифрові сервіси.

Високий рівень цифрової готовності в цих регіонах створює сприятливі умови для інтеграції безпілотних технологій у логістику гуманітарної допомоги. Наприклад, у Львівській області впроваджено навчальні центри для операторів безпілотних літальних апаратів, що дозволяє ефективно використовувати дрони для доставлення гуманітарних вантажів у важкодоступні райони [1].

У регіонах із середнім рівнем цифрової готовності, зокрема в Полтавській та Вінницькій областях, спостерігається активний розвиток цифрових послуг, проте існують обмеження щодо доступу до високошвидкісного інтернету та цифрових навичок населення. Це обмежує можливості для повноцінної інтеграції безпілотних технологій у логістичні процеси.

Регіони з низьким рівнем цифрової готовності, зокрема деякі східні області України, стикаються з викликами у впровадженні безпілотних систем через недостатню цифрову інфраструктуру, відсутність кваліфікованих кадрів та обмежений доступ до цифрових послуг. Це ускладнює ефективне використання безпілотних технологій у логістиці гуманітарної допомоги.

Таким чином, рівень цифрової готовності є ключовим фактором, що визначає ефективність інтеграції безпілотних технологій у логістику гуманітарної допомоги. Країни та регіони з високим рівнем цифрової інфраструктури та цифрових навичок мають значні переваги у впровадженні інноваційних рішень, що сприяє оперативному та ефективному реагуванню на кризові ситуації.

Застосування безпілотних технологій у логістиці гуманітарної допомоги стикається з низкою проблем, які суттєво впливають на їх ефективність і практичне застосування у кризових умовах. Одним із ключових обмежень є недостатня розвиненість цифрової інфраструктури в регіонах із високим рівнем ризику, що ускладнює забезпечення стабільного зв'язку між операторами дронів, наземними підрозділами й центрами управління логістичними операціями. В умовах, коли високошвидкісний інтернет відсутній або функціонує нестабільно, координація між безпілотними системами стає вкрай проблематичною, що призводить до збоїв у роботі логістичних ланцюгів. Така ситуація спостерігається в окремих регіонах України, де Індекс цифрової трансформації у 2024 році не перевищує 0,3 бала, що значно обмежує можливості впровадження автономних логістичних рішень [16].

Технічні обмеження також включають недостатню адаптацію безпілотних систем до умов кризових територій [12]. У зонах бойових дій або стихійних лих використання дронів часто ускладнюється наявністю пошкоджених об'єктів, нерівностей рельєфу, зон зі слабким сигналом та обмеженою видимістю. Застосування БПЛА в таких умовах вимагає впровадження додаткових сенсорів та технологій навігації, що підвищує вартість обладнання і збільшує ризики технічних несправностей.

Правові обмеження є ще одним критичним аспектом впровадження безпілотних технологій у гуманітарних місіях. У багатьох державах, включаючи Україну, відсутня чітка нормативно-правова база для регулювання польотів дронів у кризових умовах [6]. Це створює невизначеність щодо процедури отримання дозволів на польоти в зонах надзвичайних ситуацій, особливо у випадках, коли БПЛА перетинають кордони або функціонують у зонах з обмеженим повітряним простором. Відсутність гармонізованих стандартів для управління безпілотниками в міжнародних гуманітарних операціях може призвести до затримок у доставленні вантажів або втрати доступу до критично важливих територій. Крім того, правові колізії часто виникають щодо збору та оброблення даних, отриманих за допомогою дронів, що включають відео- та фотофіксацію зон стихійного лиха або бойових дій.

Інфраструктурні обмеження значною мірою визначають ефективність використання безпілотних систем у логістиці гуманітарної допомоги. У регіонах, які зазнали руйнувань унаслідок стихійних лих або воєнних дій, зруйновані дороги та транспортні вузли ускладнюють доступ до місць посадки та зльоту дронів [4]. Це змушує операторів розробляти альтернативні маршрути або використовувати мобільні платформи для старту та приземлення безпілотників, що збільшує витрати на організацію логістичних операцій.

Оптимізація логістичних процесів гуманітарної допомоги шляхом інтеграції безпілотних технологій має враховувати виявлені технічні, правові та інфраструктурні проблеми, що впливають на ефективність доставлення вантажів у кризових умовах. Одним із ключових аспектів є створення гнучкої логістичної інфраструктури, здатної оперативно адаптуватися до змін ситуації на місцях. Для цього доцільно використовувати мобільні стартові платформи для запуску БПЛА, що дозволить здійснювати доставлення вантажів навіть за умови відсутності стаціонарних злітних майданчиків. Таку практику вже було апробовано в Україні під час евакуації населення у прифронтових регіонах, де через зруйновану інфраструктуру мобільні платформи стали єдиним доступним засобом для запуску дронів.

У контексті технічної оптимізації доцільним є впровадження безпілотних систем із розширеним функціоналом, які здатні адаптуватися до складних умов місцевості та працювати в умовах обмеженої видимості. Використання тепловізійних сенсорів, систем навігації з високою точністю та автономних алгоритмів оброблення даних дозволить зменшити ризики втрати вантажів та збільшити точність доставлення до конкретних локацій. Зокрема, в Туреччині після землетрусу 2024 року такі системи застосовувалися для доставлення медикаментів у зони, де дороги були заблоковані уламками будівель. У результаті час доставлення був скорочений на 35% у порівнянні з традиційними методами.

Для підвищення рівня цифрової готовності та забезпечення стабільного обміну даними між безпілотними системами, операторами та центрами управління необхідно створити резервні комунікаційні канали на основі дронів-ретрансляторів. Такі системи можуть бути інтегровані в логістичні операції для підтримки зв'язку в зонах зруйнованої телекомунікаційної інфраструктури. У Греції після землетрусу 2024 року подібні дрони забезпечували передачу даних про маршрути доставлення гуманітарних вантажів, що дозволило уникнути хаотичної координації між підрозділами та запобігти втратам вантажів. В Україні реалізація аналогічного підходу може бути корисною в зонах з високою ймовірністю руйнування комунікаційних веж, як-от прифронтові регіони Донецької та Луганської областей.

У нормативно-правовій площині рекомендується розробити комплекс регуляторних актів, які би передбачали спеціальні дозволи на використання безпілотників у кризових умовах без необхідності проходження тривалих бюрократичних процедур. Зокрема, такі акти повинні включати положення про координацію дій між рятувальними службами, операторами БПЛА та місцевими органами влади для узгодження польотних маршрутів та мінімізації ризиків перетину маршрутів інших рятувальних систем. В Італії після повеней 2023 року було розроблено аналогічний механізм, який дозволив здійснювати оперативне доставлення вантажів без додаткових затримок, що стало вирішальним для забезпечення постраждалих необхідними ресурсами в перші години після катастрофи.

Для подолання інфраструктурних обмежень рекомендується створити спеціалізовані хаби для безпілотних систем, які би включали мобільні пункти технічного обслуговування, зарядні станції для дронів та резервні запаси обладнання. Це дозволить забезпечити безперервну роботу безпілотних платформ навіть у разі руйнування основної інфраструктури або за тривалих операцій у віддалених регіонах. У Латвії та Фінляндії подібні хаби вже використовуються для підтримки безпілотних логістичних операцій у регіонах із важкодоступним рельєфом, що значно підвищує стабільність доставлення вантажів та мінімізує ризики втрати техніки [7]. В Україні створення таких хабів може стати критично важливим у зонах, де основні транспортні маршрути залишаються заблокованими через руйнування мостів та доріг.

Таким чином, оптимізація логістичних процесів гуманітарної допомоги шляхом інтеграції безпілотних технологій має включати впровадження мобільних платформ для запуску дронів, розширення технічного функціоналу безпілотних систем, створення резервних комунікаційних каналів, удосконалення нормативної бази та формування спеціалізованих хабів для технічної підтримки. Застосування таких заходів дозволить зменшити ризики втрат вантажів, підвищити точність доставлення в кризових умовах та забезпечити стабільність роботи безпілотних систем навіть у зонах зруйнованої інфраструктури.

Висновки. Інтеграція безпілотних технологій у логістику гуманітарної допомоги забезпечує значне скорочення часу доставлення вантажів до важкодоступних регіонів, що критично важливо в умовах руйнування транспортної інфраструктури. Використання дронів дозволяє зменшити час доставлення до 30–40% порівняно з традиційними методами, а автономні платформи підвищують точність моніторингу та координації дій.

Основні проблеми впровадження включають обмежену цифрову інфраструктуру в регіонах із низьким рівнем цифрової готовності, відсутність нормативно-правової бази для кризових польотів та недостатню адаптацію дронів до роботи у складних умовах. У східних регіонах України, де Індекс цифрової трансформації у 2024 році не перевищив 0,3 бала, нестабільний зв'язок ускладнює координацію між операторами та центрами управління.

Для подолання цих обмежень доцільно створити мобільні хаби для технічного обслуговування дронів, розгорнути дрони-ретранслятори для підтримки зв'язку в кризових зонах та спростити процедури сертифікації безпілотників у надзвичайних ситуаціях. Подальші дослідження передбачають оцінювання ефективності таких заходів та розроблення адаптивних моделей логістики для кризових ситуацій.

Список літератури:

1. Воронько В., Воронько І. Області застосування безпілотних літальних апаратів. Publishing House "UKRLOGOS Group". 2021. С. 122–136. DOI: https://doi.org/10.36074/csriteenat.ed-1.08
2. Płaczek E., Świtalska A. New Technologies in Humanitarian Logistics. *Journal of Public Governance*. 2023. Vol. 65, № 3. P. 48–58. DOI: https://doi.org/10.15678/PG.2023.65.3.04
3. Estrada M. A. R., Ndoma A. The uses of unmanned aerial vehicles–UAV's-(or drones) in social logistic: Natural disasters response and humanitarian relief aid. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 375–383. URL: https://surl.li/mecwrm (date of access: 14.05.2025).
4. Azmat M., Kummer S. Potential applications of unmanned ground and aerial vehicles to mitigate challenges of transport and logistics-related critical success factors in the humanitarian supply chain. *AJSSR*. 2020. Vol. 5, № 3. P. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1186/s41180-020-0033-7
5. Коваль В., Семененко О., Баранов С., Островський С., Акініна Т., Сєченев О. Роль і місце роботизованих систем у сучасних війнах і збройних конфліктах: теоретичний аспект. *Воєнна безпека і гуманітарна допомога*. 2023. Вип. 13, № 5. С. 256–276. DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.5.24
6. Гриндей А. О. Використання штучного інтелекту в оборонній сфері. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Публічне управління та адміністрування*. 2024. Вип. 35, № 6. С. 120–123. DOI: https://doi.org/10.32782/TNU-2663-6468/2024.6/21
7. Kurpiewska-Korbut R. Digital technologies in the global humanitarian sector: A case study of Ukraine. *Journal of Modern Science*. 2024. Vol. 60, № 6. P. 730–743. https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1298117
8. Hutsul T., Khobzei M., Tkach V., Krulikovskyi O., Moisiuk O., Ivashko V., Samila A. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 7. Article e29142. URL: https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2405-8440%2824%2905173-9 (date of access: 14.05.2025).
9. Edwards D., Subramanian N., Chaudhuri A., Morlacchi P., Zeng W. Use of delivery drones for humanitarian operations: analysis of adoption barriers among logistics service providers from the technology acceptance model perspective. *Annals of Operations Research*. 2024. Vol. 335, № 3. P. 1645–1667. DOI: https://doi.org/10.1007/s10479-023-05307-4
10. Kamat A., Shanker S., Barve A., Muduli K., Mangla S. K., Luthra S. Uncovering interrelationships between barriers to unmanned aerial vehicles in humanitarian logistics. *Operations Management Research*. 2022. Vol. 15, № 3. P. 1134–1160. DOI: https://doi.org/10.1007/s12063-021-00235-7
11. Sotoudehfar S., Sarkin J. J. Drones on the Frontline: Charting the Use of Drones in the Russo-Ukrainian Conflict and How Their Use May Be Violating International Humanitarian Law. *International and Comparative Law Review*. 2023. Vol. 23, No. 2. P. 129–169. URL: https://doi.org/10.2478/iclr-2023-0018 (date of access: 16.05.2025).
12. Целлєр, В., Крамський, С. Інфраструктурна підтримка інновацій в сфері транспортної логістики в умовах турбулентності під час війни. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 67. С. 1–15. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-142
13. Alfaris R. E., Vafakhah Z., Jalayer M. Application of drones in humanitarian relief: a review of state of art and recent advances and recommendations. *Transportation Research Record*. 2024. Vol. 2678, № 7. P. 689–705. DOI: https://doi.org/10.1177/03611981231209033
14. Rejeb A., Rejeb K., Simske S., Treiblmaier H. Humanitarian drones: A review and research agenda. *Internet of Things*. 2021. Vol. 16. Article 100434. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100434 (date of access: 14.05.2025).

15. Digital Economy and Society Index (DESI) 2024. European Commission: website. URL: https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/datasets/desi/charts/desi-indicators?period=desi_2024 (date of access: 14.05.2025).

16. Індекс цифрової трансформації регіонів України 2024. Міністерство цифрової трансформації України: вебсайт. URL: https://surl.li/rvcptq (дата звернення: 14.05.2025).

Chyzhyk V.M., Shvets M.D., Ivanenko R.O. USE OF UNMANNED TECHNOLOGIES IN HUMANITARIAN AID LOGISTICS SYSTEMS DURING EMERGENCY SITUATIONS

The relevance of the study is determined by the need to improve the efficiency of humanitarian aid logistics systems in crisis situations through the integration of unmanned technologies capable of ensuring the prompt and safe delivery of resources to hard-to-reach regions. In conditions of destroyed transport infrastructure and unstable communications, unmanned systems can become a critically important tool for optimizing logistics processes.

The purpose of this article is to justify scientific approaches to the implementation of unmanned technologies in humanitarian aid logistics systems with an emphasis on ensuring timely delivery of cargo and minimizing risks to personnel in crisis situations.

The research methodology is based on a systematic analysis covering the assessment of the technical capabilities of unmanned platforms, the analysis of legal and infrastructure constraints, and the identification of key challenges for the integration of unmanned systems into humanitarian aid logistics operations. Comparative analysis, generalization of international experience, and statistical analysis of the digital readiness of regions were used.

Research results. It was found that the use of unmanned systems in humanitarian logistics can reduce delivery times by 30–40% compared to traditional transportation methods. It was found that the main problems of integration are the limited digital infrastructure in regions with low digital readiness, unstable communications, and the lack of a regulatory framework for drone flights in crisis situations. The feasibility of creating mobile hubs to support unmanned systems, including charging stations, maintenance, and backup communication channels, has been proven.

Conclusions. It has been proven that the introduction of unmanned technologies in humanitarian aid logistics is a promising direction that can significantly increase the speed of cargo delivery and reduce risks for personnel. It has been determined that the effectiveness of such systems depends on the level of digital readiness of regions, the availability of a regulatory framework for crisis flights, and the technical adaptation of platforms to complex conditions.

Prospects for further research include the development of adaptive logistics models using autonomous unmanned platforms and risk monitoring systems to optimize the delivery of humanitarian cargo in crisis regions.

Key words: *drones, autonomous platforms, crisis situations, cargo delivery, digital infrastructure, logistics optimization, implementation risks.*

УДК 656.073
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/55

Шапенко Є.М.
Національний транспортний університет

Котова С.О.
Національний транспортний університет

Ярошевський В.В.
Національний транспортний університет

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

У статті розглянуто теоретичні засади формування логістичного потенціалу як важливого інструменту підвищення ефективності діяльності промислового підприємства в умовах глобалізації та зростаючої конкуренції. Досліджено, що недостатнє впровадження логістичних підходів, а також відсутність цілісної логістичної стратегії на підприємствах, призводять до неефективного управління матеріальними, інформаційними та фінансовими потоками, що, в свою чергу, негативно впливає на конкурентоспроможність підприємств.

Визначено, що логістичний потенціал охоплює не лише наявні матеріальні, інформаційні, фінансові та кадрові ресурси, а й здатність підприємства до адаптації до динамічних змін у ринковому середовищі.

У даній статті досліджено теоретичні підходи до розкриття сутності логістичного потенціалу, зокрема ресурсний, процесний та інтеграційний, які дозволяють комплексно оцінити можливості підприємства у сфері логістики. Також у статті розглянуто структурні елементи логістичного потенціалу, до яких слід віднести транспортно-складські потужності, інформаційні системи управління, рівень цифровізації логістичних процесів тощо. Особливу увагу у роботі приділено оцінці ефективності використання логістичних ресурсів, що безпосередньо впливає на зниження витрат, підвищення швидкості логістичних операцій та оптимізацію товарних потоків. У статті наведено послідовність проведення аналізу логістичного потенціалу підприємства, до основних етапів слід віднести такі, як ідентифікація ресурсних можливостей, виявлення можливих обмежень і розробку стратегічних рішень щодо їх подолання.

Обґрунтовано, що ефективне управління логістичним потенціалом сприяє підвищенню продуктивності, прогнозуванню попиту, адаптації до ринкових змін і забезпеченню стійкого розвитку підприємства в довгостроковій перспективі.

Ключові слова: *логістичний потенціал, логістична стратегія, логістичні ресурси, промислове підприємство, логістика, логістичні ресурс, цифровізація логістики.*

Постановка проблеми. На сьогодні умови функціонування промислових підприємств можна охарактеризувати високим рівнем конкуренції, динамічністю ринкових змін та необхідністю адаптації до нових економічних викликів. Серед основних чинників забезпечення конкурентоспроможності підприємства є ефективне управління логістичними процесами, що потребує оцінки логістичного потенціалу. Логістичний потенціал охоплює сукупність матеріальних, інформаційних, фінансових і кадрових ресурсів, які можуть бути мобілізовані для досягнення стратегічних цілей підприємства в сфері логістики.

Відсутність системного підходу до формування логістичної стратегії, неефективне використання логістичних ресурсів і нерозвинена інфраструктура часто призводять до підвищення операційних витрат, зниження гнучкості підприємств і втрачених можливостей щодо зміцнення позицій на ринку. У зв'язку з цим постає необхідність ґрунтовного аналізу теоретичних засад логістичного потенціалу, його структури, ключових складових та факторів впливу, що дозволить визначити напрями оптимізації логістичних процесів.

Актуальність дослідження зумовлена потребою у формуванні ефективної логістичної

системи як складової загальної стратегії розвитку підприємства, що забезпечить не лише підвищення ефективності діяльності, а й стійкість до зовнішніх впливів. Саме тому теоретичне оцінка логістичного потенціалу промислового підприємства виступає передумовою для розробки практичних рішень, спрямованих на раціональне використання наявних ресурсів та майбутній розвиток.

Мета дослідження полягає в проведенні аналізу теоретичних основ логістичного потенціалу промислового підприємства, визначенні його ключових складових, а також виявленні основних факторів, що впливають на формування та розвиток логістичного потенціалу з метою підвищення ефективності логістичних процесів і конкурентоспроможності підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1, с. 176] досліджено ефективність управління підприємством на основі логістичного підходу. Показано важливість врахування регіонального аспекту при формуванні логістичної інфраструктури та пропонується класифікація регіональних промислових потоків, що може бути використана при побудові логістичної інфраструктури на рівні галузі та окремих підприємств.

У роботі [2, с. 344] розглянуто сутність логістичного потенціалу та його вплив на вибір логістичної стратегії підприємства. Авторами визначено основні показники для оцінки логістичного потенціалу та запропоновано механізм реалізації логістичної стратегії на основі цієї оцінки.

Науковці [3, с. 281] пропонують розробку комплексної системи для вимірювання та аналізу якості управління логістичним потенціалом. Автори пропонують систему ключових показників ефективності, що охоплює аспекти ефективності, точності, задоволеності клієнтів та сталості, а також надають практичні рекомендації для покращення управління логістичним потенціалом підприємств.

Основні теоретико-методологічні засади формування логістичної системи на підприємстві наведено в роботі [4, с. 50], що є важливим для розуміння процесів формування логістичного потенціалу.

У науковій праці [5, с. 107] розглянуто теоретико-методологічні засади формування логістичних потоків, які забезпечують конкурентоспроможність підприємств. Автори аналізують основні складові логістичних потоків та їх взаємозв'язок.

Важливим для оцінки логістичного потенціалу підприємства є надійність та ефективність діяльності логістичних ланцюгів [6, с. 33]. Також, наведено основні теоретичні засади та класифікацію логістичного ланцюга поставок.

У статті [7, с. 20] розглядається ефективність використання метрик логістики підприємствами різних сегментів логістичних послуг. Автори підкреслюють необхідність сучасних методичних інструментів для ефективного управління логістичним потенціалом, що дозволяє керівникам обирати правильні пріоритети в інноваційній, кадровій, інвестиційній та маркетинговій політиці підприємства.

У роботі [8, с. 301] досліджується логістичний потенціал регіону та його вплив на розвиток підприємств. Запропоновано методику оцінки логістичного потенціалу, яка враховує основні фактори, необхідні для планування подальшого розвитку регіону.

Стаття [9, с. 4701] присвячена теоретичним основам та практичним застосуванням промислових логістичних систем. Автори аналізують складові логістичних систем, включаючи людей, організацію та технології, та обговорюють їхній вплив на ефективність виробництва.

Науковцями [10, с. 280] представлено теоретичну модель створення віртуальних логістичних центрів на основі методів теорії графів. Обґрунтовано можливість об'єднання діяльності окремо розташованих інтермодальних терміналів та складів для покращення логістичного обслуговування клієнтів.

Стаття [11, с. 379] присвячена оцінці рівня та готовності внутрішньої логістики підприємств до впровадження технологій Індустрії 4.0. Автори пропонують методологію для об'єктивної оцінки та підготовки логістичних процесів до цифровізації та автоматизації.

Постановка завдання. Обґрунтування теоретичних підходів до формування та оцінювання логістичного потенціалу промислового підприємства як інструменту для підвищення ефективності функціонування логістичної системи та адаптації її до змін навколишнього середовища.

Виклад основного матеріалу. У контексті трансформацій сучасного глобального бізнес-середовища, що характеризується посиленням конкуренції, зростанням динаміки ринкових процесів та підвищенням вимог з боку споживачів, підприємства повинні переорієнтовувати свої стратегічні пріоритети, маючи на меті бути максимально корисними для споживачів. За таких

умов логістика набуває нового, значно ширшого функціонального змісту, а саме, на сьогодні логістика це не лише транспортування, складування та обробки матеріальних потоків, вона трансформується в інтегрований елемент управління всіма ланками ланцюга постачання.

Сучасна логістика розглядається як системоутворювальний чинник забезпечення ефективного функціонування підприємства, здатний генерувати додаткову вартість на кожному етапі логістичного ланцюга. Її роль суттєво розширюється в напрямі стратегічного управління ресурсами, координації інформаційних, фінансових і матеріальних потоків, а також забезпечення взаємодії з внутрішніми та зовнішніми стейкхолдерами. В даному контексті логістичний потенціал підприємства виступає як комплексна категорія, що охоплює матеріально-технічні, технологічні, кадрові, інформаційні та управлінські ресурси, необхідні для реалізації логістичних функцій на високому рівні.

Аналіз сучасного стану промислового виробництва в Україні представлено на рисунку 1. Можна спостерігати значну динаміку та нестабільність протягом 2021–2024 років.

Зокрема, індекс промислового виробництва демонстрував значні коливання: після відносно стабільного рівня у 2021 році (97,8) у 2022 році відбулося різке зниження до 55,3, що стало результатом військових дій. У 2023 році спостерігалося суттєве зростання до 123,8, однак у 2024 році показник знову знизився до 89,7, що показує певну нестабільність промислового сектору [12, с. 139].

Складові та фактори, що мають безпосередній вплив на промислове підприємство наведено на рисунку 2.

Розробка логістичної стратегії для промислового підприємства є важливим процесом, що спрямований на підвищення ефективності управління матеріальними, інформаційними та фінансовими потоками [7, с. 20]. Логістична стратегія

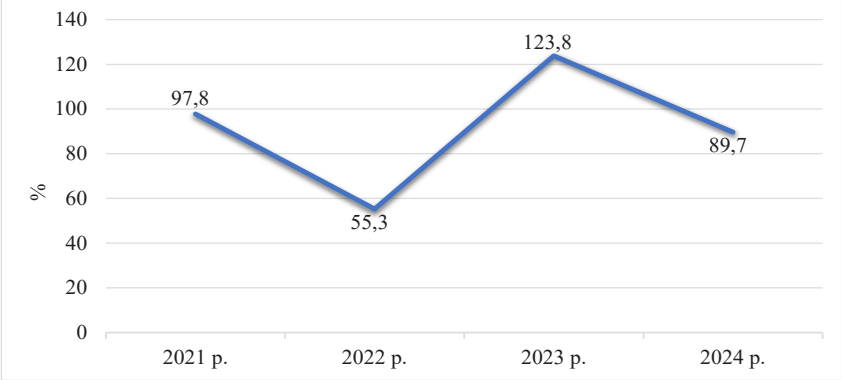


Рис. 1. Динаміка зміни індексу промислового виробництва в Україні 2021–2024 роках

Рис. 2. Складові та фактори що впливають на промислове підприємство

дозволяє оптимізувати виробничі процеси, знизити витрати на транспортування, складування та управління запасами, що, у свою чергу, сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємства.

Комплексний аналіз логістичного потенціалу дозволяє ідентифікувати внутрішні резерви підвищення продуктивності, оптимізувати використання ресурсів і мінімізувати витрати, що сприяє стратегічному розвитку підприємства [8, с. 301].

Перший етап – оцінка системи показників оцінки логістичного потенціалу, що включає як загальні показники (коефіцієнт задоволення потреб, рівномірності поставок, співвідношення запасів і вихідного потоку), так і специфічні показники (коефіцієнт якості обслуговування, безвідмовності обслуговування, завантаженості логістичних об'єктів). Ці показники дозволяють оцінити ефективність логістичних процесів та їх вплив на загальну діяльність підприємства (рис. 3).

Формування логістичної стратегії з урахуванням індексу логістичного потенціалу, визначається логістична місія підприємства, аналізуються ключові бізнес-процеси, розраховуються показники використання ресурсів та оцінюється внесок логістики в загальну діяльність підприємства (рис. 4).

Впровадження логістичної стратегії на промисловому підприємстві включає оцінку логістичного потенціалу, формулювання мети та завдань, планування ресурсів і визначення обсягів витрат.

Реалізація логістичного потенціалу дозволяє підприємствам досягати синергетичного ефекту в межах ланцюгів постачання, підвищувати адаптивність до зовнішніх змін, забезпечувати високу якість обслуговування споживачів та формувати стійкі конкурентні переваги. Відтак, логістика постає не лише як інструмент підвищення операційної ефективності, а як стратегічний актив, що визначає траєкторію розвитку підприємства в довгостроковій перспективі.

Висновки. Отже, виходячи з вищевикладеного, у сучасних умовах глобалізації та високої конкуренції промислові підприємства змушені шукати нові шляхи підвищення ефективності своєї логістичної діяльності. Одним із головних засобів забезпечення конкурентоспроможності є логістичний потенціал, який надає можливість підприємству ефективно управляти

Рис. 3. Показники, необхідні для оцінки логістичного потенціалу

Рис. 4. Етапи формування логістичної стратегії промислового підприємства

матеріальними, інформаційними та фінансовими потоками.

Проведене дослідження показало, що аналіз теоретичних основ логістичного потенціалу промислового підприємства дозволяє дослідити його структуру, складові елементи та фактори впливу. Це, у свою чергу, сприятиме розробці стратегій оптимізації логістичних процесів для промислового підприємства та дозволить підвищити продуктивність, а також знизити витрати.

Важливими показниками для оцінки логістичного потенціалу можна назвати коефіцієнти задоволення потреб, рівномірності поставок, якості обслуговування та завантаженості потужностей.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що запропоновані рекомендації можуть стати основою для розробки адаптивних логістичних стратегій, здатних реагувати на динаміку ринку в умовах якого функціонуватиме досліджуване підприємство.

Список літератури:

1. Тарабан К. С. Теоретичні аспекти побудови логістичної інфраструктури промислового підприємства. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2012. Вип. 24. С. 176–182.

2. Гуржій Н. М., Оверченко А. І.. Оцінка логістичного потенціалу підприємства як основа вибору його логістичної стратегії. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2016. № 13. С. 344–348.

3. Хмарська І., Сігаєва Т., Бачинська О. Оцінки ефективності та якості управління логістичним потенціалом. *Економіка та суспільство.* 2022. № 38. – С. 281–288.

4. Костюк Г. В., Булах А. В.. Теоретико-методологічні засади формування логістичної системи. *Збірник наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну*. 2016. Вип. 2 (97). С. 50–55.

5. Кучкова О. В., Колесніков Є. В.. Теоретичне обґрунтування взаємозв'язку логістичних потоків промислового підприємства. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2015. Вип. 30. С. 107–113.

6. Гірна О. Б. Формування теоретичних засад функціонування логістичного ланцюга поставок. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Логістика.* 2020. № 33. С. 33–39.

7. Shulga A. V., Danylenko Y. V., Polupanova A. V.. Logistics potential of enterprise: theoretical and applied aspects. *Proceedings of the 6th International Conference on Strategies, Models and Technologies of Economic Systems Management.* 2021.

8. Ponomarenko T. V., Ponomarenko V. M., Deineko M. M.. An estimation of the logistics potential of enterprises in the region's management. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2018. Vol. 4, No. 3. P. 301–307.

9. Ivanov D., Tsipoulanidis A., Schönberger J.. Industrial logistics systems: theory and applications. *International Journal of Production Research*. 2011. Vol. 49, No. 16. P. 4701–4702.

10. Wengrzik J., Sliwczynski R.. Theoretical framework for virtual logistics centers creation. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 9. Article No. 3680.

11. Klimecka-Tatar D., Ingaldi T.. Evaluation of the level and readiness of internal logistics for Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 13. Article No. 6130.

12. 12. Shapenko Y., Kotova S., Yaroshevskyy V. Substantiation of the theoretical foundations of the logistics potential of an industrial enterprise. *The 13th International scientific and practical conference* "Problems, current state and prospects for business development", Graz, Austria, 1–4 квіт. 2025. 2025. С. 139–141. ISBN 979-8-89692-726-6. URL: https://doi.org/10.46299/ISG.2025.1.13.

Shapenko Ye.M., Kotova S.O., Yaroshevskyi V.V. THEORETICAL FOUNDATIONS OF FORMATION AND EVALUATION OF THE LOGISTICS POTENTIAL OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

The article examines the theoretical principles of the formation of logistics potential as an important tool for increasing the efficiency of an industrial enterprise in the context of globalization and growing competition. It is studied that insufficient implementation of logistics approaches, as well as the absence of a holistic logistics strategy at enterprises, lead to ineffective management of material, information and financial flows, which, in turn, negatively affects the competitiveness of enterprises.

It is determined that logistics potential includes not only the available material, information, financial and human resources, but also the ability of the enterprise to adapt to dynamic changes in the market environment.

This article examines theoretical approaches to revealing the essence of logistics potential, in particular resource, process and integration, which allow a comprehensive assessment of the capabilities of the enterprise in the field of logistics. The article also examines the structural elements of logistics potential, which include transport and warehouse capacities, information management systems, the level of digitalization of logistics processes, etc. Particular attention is paid to the assessment of the efficiency of the use of logistics resources, which directly affects the reduction of costs, increasing the speed of logistics operations and optimizing commodity flows. The article presents the sequence of conducting an analysis of the logistics potential of an enterprise, the main stages of which include the identification of resource capabilities, the identification of possible limitations and the development of strategic solutions to overcome them.

It is substantiated that effective management of logistics potential contributes to increasing productivity, forecasting demand, adapting to market changes and ensuring sustainable development of the enterprise in the long term.

Key words: *logistics potential, logistics strategy, logistics resources, industrial enterprise, logistics, logistics resources, digitalization of logistics.*

УДК 656.038
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/56

Шпак Н.Г.
Одеський національний морський університет

Літачевський В.В.
Одеський національний морський університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИ ВИКОНАННІ МІЖНАРОДНИХ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ

У статті розглянуто ключові аспекти організації та оптимізації транспортних ланцюгів у контексті міжнародних морських перевезень вантажів, які на сьогодні відіграють критичну роль у забезпеченні глобальної торгівлі та економічної взаємодії між країнами. Зростання обсягів міжнародної торгівлі, інтенсифікація процесів глобалізації, а також підвищення вимог до логістичної ефективності змушують учасників транспортного процесу переглядати традиційні підходи до побудови логістичних ланцюгів з урахуванням сучасних викликів і технологічних змін.

У процесі дослідження були виокремлені чотири ключові фактори, що мають безпосередній вплив на ефективність транспортних ланцюгів: географічне розташування портів, швидкість та якість обробки вантажу, тарифна політика та рівень цифровізації. Порти, які мають вигідне географічне положення, розвинену інфраструктуру та мультимодальне сполучення з іншими видами транспорту, забезпечують більш короткі терміни доставки й сприяють зниженню логістичних витрат. Автоматизація портових процесів, використання роботизованих систем навантаження та сучасного програмного забезпечення для управління складами дозволяє уникнути затримок та зменшити час простою суден.

Також стаття висвітлює негативний вплив застарілих методів управління маршрутами, неефективного документообігу та екологічно шкідливих джерел енергії на загальну продуктивність транспортного ланцюга. Бюрократичні труднощі при митному оформленні, зокрема відсутність єдиних цифрових платформ та повільне погодження документів, призводять до додаткових затримок у проходженні вантажів через порти. Високий рівень викидів парникових газів у морському транспорті також вимагає впровадження інноваційних рішень у сфері екологічного судноплавства.

Результати дослідження підтверджують необхідність системного підходу до вдосконалення міжнародних транспортних ланцюгів і демонструють, що лише інтеграція інфраструктурних, технологічних, адміністративних та екологічних рішень дозволить забезпечити конкурентоспроможність морських перевезень на глобальному ринку.

Ключові слова: *міжнародні перевезення, транспортний ланцюг, морський транспорт, логістика, порти, цифровізація, митне оформлення, екологічність, оптимізація маршрутів.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах стрімкого розвитку міжнародної торгівлі та глобалізації економічних процесів ефективне функціонування транспортних ланцюгів набуває особливої ваги. Морські перевезення, як ключова складова міжнародної логістики, забезпечують понад 80% світового товарообігу, однак стикаються з низкою викликів, що знижують їх продуктивність і конкурентоспроможність.

Застаріла інфраструктура портів, низький рівень автоматизації, неефективне управління логістичними маршрутами, складні бюрократичні процедури та екологічні загрози створюють значні бар'єри на шляху до оптимізації транспортних потоків. У таких умовах виникає нагальна потреба в комплексному дослідженні чинників, що впливають на ефективність транспортних ланцюгів, та пошуку шляхів їх удосконалення з урахуванням сучасних технологічних рішень і глобальних тенденцій сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками зростає науковий інтерес до проблематики ефективного функціонування транспортно-логістичних систем, зокрема в сфері міжнародних морських перевезень. У працях провідних вітчизняних та зарубіжних дослідників наголошується на ключовій ролі морського транспорту в глобальних ланцюгах

постачання [1–3]. Вивчаються питання інтеграції портів у логістичну інфраструктуру, вплив цифровізації на швидкість обробки вантажів, оптимізація мультимодальних маршрутів та впровадження екологічно безпечних технологій судноплавства [4–6].

Особливу увагу приділяють аналізу цифрової трансформації портових систем (Port Community Systems, блокчейн у митному оформленні, системи автоматизації складів), а також використанню великих даних та штучного інтелекту для прогнозування затримок і моделювання логістичних рішень [7]. У публікаціях Міжнародної морської організації (IMO) [8], Світового банку та Європейської економічної комісії ООН акцент зроблено на необхідності розвитку «зеленого» транспорту [9], підвищення прозорості логістичних ланцюгів та забезпечення стійкості до глобальних криз (таких як пандемії чи воєнні події) [10–11].

Разом з тим, в оглянутих дослідженнях переважає фрагментарний підхід: недостатньо системно розглядаються міждисциплінарні взаємозв'язки між інфраструктурними, адміністративними, технологічними та екологічними аспектами функціонування морських транспортних ланцюгів. Саме тому постає потреба в комплексному аналізі факторів, що впливають на ефективність міжнародних морських перевезень, а також у розробці практичних рекомендацій щодо їх оптимізації на основі сучасних інноваційних інструментів.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз структури та функціонування транспортних ланцюгів, визначення основних проблем і бар›єрів, що виникають під час здійснення морських перевезень, а також формулювання практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності логістичних процесів на всіх етапах переміщення вантажів.

Виклад основного матеріалу. Міжнародні морські перевезення відзначаються високим рівнем складності через участь великої кількості суб'єктів, зокрема портових операторів, експедиторів, митних органів, логістичних компаній та державних регуляторів. Ефективність їх взаємодії значною мірою визначає швидкість доставки вантажів, рівень витрат, безпеку та екологічну сталість процесів.

Проте сучасна практика демонструє наявність низки системних проблем: застаріла інфраструктура портів, низький рівень цифровізації, складні митні процедури, нераціональна маршрутизація та екологічні виклики. Все це обумовлює необхідність глибокого аналізу функціонування транспортних ланцюгів та пошуку шляхів їх модернізації відповідно до міжнародних стандартів і сучасних технологічних тенденцій.

Міжнародні морські перевезення стикаються з рядом проблем, які можуть впливати на ефективність транспортного ланцюга. Серед основних проблем можна виділити:

• Низький рівень автоматизації портових процесів, що призводить до затримок у завантаженні та розвантаженні суден. Відсутність сучасних технологій ускладнює контроль за вантажопотоками та знижує продуктивність роботи портових операторів.

• Високі витрати на логістичні операції, спричинені недостатньою оптимізацією маршрутів та використанням застарілих методів управління. Це призводить до збільшення вартості перевезень та зменшення конкурентоспроможності перевізників.

• Бюрократичні труднощі при митному оформленні, що збільшує час проходження товарів через порти. Довготривале оформлення документів та відсутність єдиної цифрової системи ускладнюють координацію між учасниками ланцюга.

• Екологічні виклики, пов'язані з викидами шкідливих речовин від суден. Використання традиційного пального спричиняє значне забруднення навколишнього середовища та вимагає розробки екологічних ініціатив.

Для покращення ефективності транспортних ланцюгів пропонуються такі заходи, які спрямовані на усунення існуючих проблем та підвищення ефективності морських перевезень (рис. 1):

1. Запровадження цифрових технологій у портах. Автоматизація процесів перевірки та обробки вантажу дозволить значно скоротити час простою суден та підвищити швидкість розвантажувальних і завантажувальних операцій. Використання штучного інтелекту та Інтернету речей (IoT) для моніторингу вантажів забезпечить кращу координацію між учасниками транспортного процесу. Крім того, впровадження електронного документообігу зменшить бюрократичні процедури та мінімізує ризик людських помилок., що дозволить автоматизувати процеси перевірки та обробки вантажу. Використання сучасних систем управління допоможе зменшити час простою суден та прискорити операції з обробки контейнерів.

Рис. 1. Заходи по усуненню існуючих проблем та підвищення ефективності морських перевезень
Джерело: розроблено авторами

2. Оптимізація логістичних маршрутів. Використання аналітичних систем та великих даних (Big Data) допоможе виявити найбільш ефективні маршрути та скоротити час доставки. Прогнозування можливих затримок через погодні умови або портові перевантаження сприятиме кращому плануванню перевезень. Також розвиток мультимодальних перевезень дозволить ефективно поєднувати морський транспорт з іншими видами транспорту, такими як залізничний чи автомобільний, що зменшить загальні витрати та час доставки. за допомогою аналітичних систем, що допоможе знизити витрати на транспортування. Розробка ефективних маршрутів дозволить скоротити час доставки вантажів та покращити загальну ефективність перевезень.

3. Спрощення митних процедур через цифровізацію документообігу. Використання електронних платформ для обміну інформацією між митними службами різних країн дозволить значно скоротити час перевірки документів. Автоматизація процесів митного контролю за допомогою блокчейн-технологій сприятиме зменшенню випадків шахрайства та підвищенню прозорості операцій. Крім того, єдина база даних щодо вантажопотоків дозволить швидше проводити аналіз і ухвалювати рішення щодо митного оформлення товарів., що скоротить час оформлення вантажів. Автоматизація процесу митного контролю зменшить ризики затримок і сприятиме швидшому проходженню товарів через кордони.

4. Перехід на екологічно чисті види пального та зменшення викидів CO_2. Впровадження сучасних екологічних технологій у судноплавстві, таких як використання зрідженого природного газу (LNG), водневого пального та вітрових чи сонячних генераторів на суднах, дозволить суттєво зменшити викиди парникових газів. Також варто розвивати інфраструктуру для бункерування суден альтернативними видами пального та підтримувати міжнародні ініціативи з декарбонізації морського транспорту. завдяки впровадженню сучасних технологій у судноплавстві. Використання альтернативних джерел енергії, таких як зріджений природний газ або водневе паливо, дозволить суттєво знизити негативний вплив на довкілля.

Комплексний підхід до вдосконалення цих факторів дозволить значно покращити ефективність транспортних ланцюгів у міжнародних морських перевезеннях, сприятиме зменшенню витрат, підвищенню надійності логістичних операцій та екологічній безпеці морського транспорту (рис. 2).

Рис. 2. Залежність ефективності транспортного ланцюга від основних факторів
Джерело: розроблено авторами

Ефективність транспортного ланцюга залежить від багатьох факторів, серед яких можна виділити наступні:

• Географічне розташування портів. Порти, що розташовані у стратегічно важливих місцях, мають розвинену інфраструктуру та зручні транспортні сполучення з іншими видами транспорту, здатні значно скоротити витрати та час перевезення.

• Швидкість та якість обробки вантажу. Рівень автоматизації портових процесів безпосередньо впливає на ефективність перевезень. Використання сучасних контейнерних кранів, роботизованих складів та автоматичних систем навантаження дозволяє зменшити час простою суден і уникнути затримок у постачанні.

• Тарифна політика та вартість транспортних послуг. Витрати на паливо, портові збори, мито та страхові платежі значною мірою впливають на економічну доцільність перевезень. Оптимізація логістичних витрат може сприяти покращенню конкурентоспроможності компаній на ринку міжнародних перевезень.

• Рівень цифровізації. Впровадження інноваційних технологій, таких як GPS-моніторинг, автоматизовані системи управління ланцюгами постачання (SCM) та штучний інтелект, сприяє підвищенню прозорості та безпеки логістичних процесів. Використання хмарних платформ для обміну інформацією між усіма учасниками транспортного ланцюга забезпечує ефективну координацію операцій та мінімізує ризики затримок.

Для комплексної оцінки ефективності транспортних ланцюгів у сфері міжнародних морських перевезень пропонується використання багатокритеріального підходу, що поєднує кількісні та якісні показники (рис. 3). Методика включає п'ять основних блоків:

1. Інфраструктурна оцінка: Пропускна здатність порту (TEU/рік), рівень автоматизації терміналів (% обладнання з цифровим керуванням), наявність мультимодального сполучення (бали за шкалою 0–10). Метод: аналітична оцінка технічної готовності портів до обслуговування великих обсягів вантажів.

2. Логістична ефективність: Середній час проходження вантажу (у годинах/днях), кількість перевантажень в ланцюзі, витрати на одиницю перевезення (дол./т або дол./TEU). Метод: розрахунки на основі даних логістичних операторів та митної статистики.

3. Цифровізація та управління: Рівень інтеграції цифрових систем (SCM, GPS, блокчейн),

Рис. 3. Оцінка ефективності транспортних ланцюгів у міжнародних морських перевезеннях з використанням багатокритеріального підходу

Джерело: розроблено авторами

частка електронного документообігу (%), наявність єдиної інформаційної платформи. Метод: опитування операторів і адміністрацій портів, контент-аналіз IT-рішень.

4. Адміністративна прозорість: Середній час митного оформлення (год/днів), кількість адміністративних процедур, індекс прозорості (за даними міжнародних звітів, напр. Doing Business). Метод: порівняльний аналіз за країнами/портами.

5. Екологічна сталість: Обсяг викидів CO_2 на перевезену тонну вантажу, частка використання альтернативного пального (%), наявність екологічних сертифікатів (ISO 14001, ESI). Метод: аналіз екологічних звітів судноплавних компаній та портів.

При цьому застосовується метод зваженої суми балів, де кожному блоку надається коефіцієнт важливості (наприклад: логістика – 30%, інфраструктура – 25%, цифровізація – 20%, адміністративна ефективність – 15%, екологія – 10%).

Оцінка кожного показника нормалізується за шкалою 0–1, після чого виводиться інтегральний показник транспортного ланцюга (ІПТЛ):

$$\text{ІПТЛ} = \sum(W_i * B_i)$$

де: W_i – вага критерію,

B_i – нормалізоване значення показника.

Запропонована методика дозволяє не лише порівнювати ефективність різних транспортних маршрутів чи портів, а й визначати слабкі ланки у морському логістичному ланцюгу та обґрунтовувати напрями модернізації.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що ефективність міжнародних морських перевезень тісно пов'язана зі станом транспортних ланцюгів, які включають порти, логістичну інфраструктуру, митні служби та екологічні стандарти. Ключовими чинниками, що впливають на якість і швидкість перевезень, є рівень цифровізації процесів, автоматизація портових операцій, оптимізація маршрутів і впровадження сталих рішень у судноплавстві.

Застаріла інфраструктура, надмірна бюрократія та нераціональне використання ресурсів призводять до затримок, збільшення витрат і втрати конкурентних переваг. Для досягнення сталого розвитку та підвищення ефективності перевезень необхідно впроваджувати інноваційні технології, зокрема блокчейн та системи прогнозування, а також активізувати співпрацю між усіма учасниками логістичного процесу. Комплексний підхід до вдосконалення транспортних ланцюгів дозволить забезпечити стабільність і надійність міжнародної логістики в умовах глобальних викликів.

Список літератури:

1. Назаренко О. В. Транспортна логістика в умовах цифрової трансформації: виклики та перспективи / Економіка та держава. 2021. № 9. С. 45–49.
2. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. 5th ed. New York: Routledge, 2020. 440 p. DOI: https://doi.org/10.4324/9780429346341
3. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2023. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2023. https://unctad.org
4. Acciaro, M., Sys, C., Ferrari, C., & Roumboutsos, A. Sustainable port operations: challenges and opportunities. *Research in Transportation Business & Management*, 2020. 312 p.
5. Коваленко І. В. Розвиток мультимодальних перевезень як чинник підвищення ефективності логістичних систем / Вісник економіки транспорту і промисловості. 2020. № 71. С. 129–135.
6. Шевченко А. М., Морозов В. С. Екологічні аспекти розвитку морського транспорту України / Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології. 2022. № 40. С. 85–92.
7. Шпак Н.Г., Літачевський В.В. Дослідження якості транспортно-експедиторського обслуговування міжнародних вантажопотоків. Зб. наукових праць за матеріалами ІІІ-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт: наука та практика», Київ, СНУ ім. В.Даля, 2024. С. 4–8.
8. IMO (International Maritime Organization). IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. London: IMO, 2018. https://www.imo.org
9. World Bank. Digital Transformation of the Port Sector: A Critical Agenda. Washington, D.C.: World Bank Group, 2021. 84 p.
10. Павловська Л.А., Кириллова О.В., Коробкова О.М., Шпак Н.Г. Особливості моделювання інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів у сучасних умовах. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського, серія: технічні науки, Том 34 (73) № 2 (2023). С. 172–179.
11. Шпак Н.Г., Павловська Л.А., Коробкова О.М., Цифрова трансформація системи управління морським портом: новітні можливості та виклики в умовах воєнного стану / Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського, серія: технічні науки, Том 36 (75) № 1 (2025). С. 389–394.

Shpak N.G., Litachevskyi V.V. RESEARCH OF TRANSPORT CHAINS IN INTERNATIONAL MARITIME CARGO TRANSPORTATION

The article examines the key aspects of the organization and optimization of transport chains in the context of international maritime freight transportation, which today play a critical role in ensuring global trade and economic interaction between countries. The growth of international trade volumes, the intensification of globalization processes, as well as increasing demands for logistics efficiency compel participants in the transport process to reconsider traditional approaches to building supply chains, taking into account current challenges and technological changes.

In the course of the research, four key factors were identified that have a direct impact on the efficiency of transport chains: the geographical location of ports, the speed and quality of cargo handling, tariff policy, and the level of digitalization. Ports with a favorable geographical position, developed infrastructure, and multimodal connections with other types of transport provide shorter delivery times and contribute to reducing

logistics costs. The automation of port processes, the use of robotic loading systems, and modern warehouse management software help avoid delays and reduce vessel idle time.

The article also highlights the negative impact of outdated route management methods, inefficient document workflows, and environmentally harmful energy sources on the overall performance of the transport chain. Bureaucratic challenges in customs clearance, particularly the absence of unified digital platforms and slow document approvals, lead to additional delays in cargo movement through ports. The high level of greenhouse gas emissions in maritime transport also requires the implementation of innovative solutions in the field of green shipping.

The results of the study confirm the need for a systematic approach to improving international transport chains and demonstrate that only the integration of infrastructure, technological, administrative, and environmental solutions will ensure the competitiveness of maritime transport in the global market.

Key words: *international transportation, transport chain, maritime transport, logistics, ports, digitalization, customs clearance, environmental sustainability, route optimization.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/57

Антропов А.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губар В.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ КОНТРОЛЕРУ КЕРУВАННЯ ПОВОРОТОМ АНТЕНИ

У статті розглянута концепція побудови пристрою, який представляє собою контролер повороту антени з можливістю керування положенням по двох осях – горизонтальній та вертикальній.

Актуальність розробки полягає в необхідності створення компактного, автономного та точного приладу для дистанційного управління положенням антени в умовах, коли безпосередній доступ до неї є складним або небезпечним. Така система може знайти застосування у сферах зв'язку, радіотехніки, моніторингу, а також у військовій техніці, де важливо забезпечити контроль напряму антени без присутності оператора.

У даній статті розглядається реалізація пристрою на базі мікроконтролера ATmega32u4, який забезпечує керування кроковими двигунами через драйвери TB6600, збір даних з акселерометра для визначення положення антени, а також відображення інформації на OLED-дисплеї. Додатково реалізовано модуль живлення з можливістю автономної роботи від акумуляторів 18650, контроль заряду яких здійснюється за допомогою модуля TP4056.

Головною особливістю пристрою є можливість точного позиціонування антени завдяки використанню інерціального сенсора (акселерометра) та крокових виконавчих механізмів, що дозволяє реалізувати детерміноване керування навіть за відсутності зворотного зв'язку від сервомеханізмів. Передбачена можливість ручного керування положенням антени через зовнішні кнопки, підключені до портів мікроконтролера, що у поєднанні з компактним інтерфейсом забезпечує зручність експлуатації.

У статті запропоновано підхід до побудови пристрою на основі доступних та недорогих компонентів, який може бути масштабований та модифікований для специфічних задач користувача, включаючи автоматичне відстеження сигналу, слідкування за супутниками або спрямований зв'язок у динамічних системах.

Ключові слова: *контролер повороту антени, ATmega32u4, кроковий двигун, TB6600, акселерометр, автономне живлення, дистанційне керування, позиціонування, інтерфейс користувача.*

Постановка проблеми. У сучасних радіоелектронних системах, зокрема в антенних комплексах, телекомунікаційних пристроях, системах дистанційного зондування та аматорських станціях, значну роль відіграє точне і кероване орієнтування антен. Забезпечення правильного напрямку антенного випромінювання або прийому сигналу істотно впливає на якість зв'язку, швидкість передавання даних і надійність функціонування системи загалом.

Однією з основних проблем у таких системах є необхідність автоматизованого або дистанційного управління положенням антени, що особливо актуально в мобільних, автономних або польових умовах, де використання стаціонарних та дорогих комерційних рішень є недоцільним або неможливим. Пристрої, які дозволяють реалізувати точне позиціонування антени, зазвичай складні в налаштуванні, громіздкі або споживають надмірну кількість енергії.

Окрім цього, значною проблемою є відсутність візуального контролю за положенням антени у просторі, що знижує ефективність її використання та ускладнює точне наведення,

наприклад, на супутник чи джерело сигналу. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні компактного, енергоефективного та недорогого пристрою, здатного точно керувати поворотом антени, надаючи при цьому користувачеві зручний інтерфейс контролю і зворотного зв'язку.

З огляду на широке застосування мікроконтролерів у вбудованих системах, доцільним є використання мікроконтролера з достатньою кількістю портів введення/виведення, підтримкою інтерфейсів I2C та USB, можливістю автономного живлення, що дозволяє реалізувати універсальний контролер для позиціювання антен із відображенням даних у реальному часі.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є розробка мобільного мікроконтролерного пристрою, здатного:

- керувати обертанням антени з використанням драйверів крокових двигунів;
- фіксувати положення антени у просторі за допомогою інерціальних сенсорів (акселерометра);
- відображати інформацію про кут нахилу або положення на OLED-дисплеї;
- працювати в автономному режимі з живленням від акумулятора;
- мати можливість розширення функціональності (наприклад, через Bluetooth чи GPS у майбутньому).

Розв'язання цієї проблеми дозволить створити базову платформу для використання у системах радіозв'язку, навігації, дистанційного керування та освітніх STEM-проєктах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика автоматизованого управління антенними системами активно досліджується в галузі телекомунікацій, радіоелектроніки та систем дистанційного керування. Основні напрямки досліджень включають розробку систем позиціонування антен з використанням

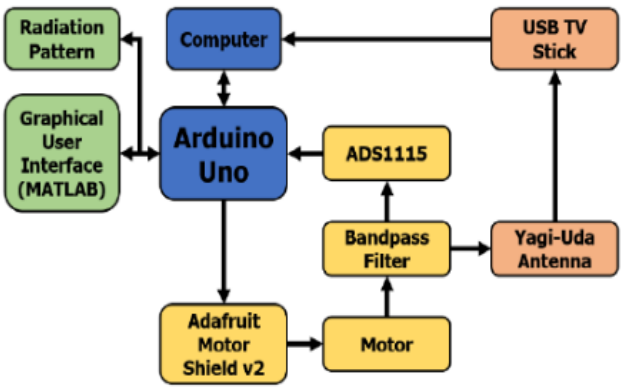


Рис. 1. Блок-схема запропонованої системи позиціонування антени

крокових двигунів, застосування інерційних сенсорів для визначення просторового положення, а також розробку інтерфейсів зворотного зв'язку для користувача.

У роботі [1] представлено систему позиціонування антени, яка використовує Arduino Uno, кроковий двигун та модуль L293D для управління положенням антени типу Yagi-Uda. Система дозволяє автоматично змінювати напрямок антени для покращення прийому телевізійного сигналу.

Інше дослідження [2] описує IoT-базовану систему позиціонування антени, що використовує NodeMCU, крокові двигуни та сенсори для визначення напрямку. Користувач може дистанційно керувати положенням антени через мобільний додаток Blynk, що забезпечує зручність та гнучкість у налаштуванні системи.

Рис. 2. Апаратний блок, що містить сенсорний модуль MPU-6050

Застосування інерційних сенсорів, зокрема MPU6050, для визначення кута нахилу та положення антени розглядається в роботі [3]. Автори досліджують методи зниження шуму в даних, отриманих від акселерометра та гіроскопа, що дозволяє підвищити точність вимірювань у системах навігації та позиціонування.

Щодо живлення автономних пристроїв, у роботі [4] описано використання модуля TP4056 для заряджання літій-іонних акумуляторів у портативних сонячних зарядних пристроях. Автори підкреслюють важливість ефективного

управління зарядом для забезпечення стабільної роботи автономних систем.

Виведення інформації на OLED-дисплеї в системах позиціонування антен розглядається в роботі [5], де описано використання дисплеїв для відображення кута нахилу та інших параметрів системи в реальному часі, що покращує взаємодію користувача з пристроєм.

Аналіз вищезазначених досліджень показує, що хоча існують окремі рішення для задач позиціонування та контролю антен, вони здебільшого реалізуються ізольовано. Відсутній комплексний підхід, який би об'єднав апаратне забезпечення, керування, зворотний зв'язок та живлення в одному пристрої. Більшість систем не адаптовані для роботи в автономному режимі, не мають енергоефективної архітектури та не передбачають можливість масштабування або інтеграції з іншими пристроями.

У зв'язку з цим, актуальною є розробка універсальної компактної платформи керування положенням антени, яка б поєднувала драйвери потужних крокових двигунів, інерційний сенсор для вимірювання кута нахилу, живлення від акумулятора, візуальний інтерфейс (OLED) та мікроконтролер із підтримкою USB та Bluetooth.

Постановка завдання. Метою даної наукової роботи є проєктування функціонально завершеного, автономного контролера для керування поворотом антени, який поєднує в собі апаратні та програмні засоби, оптимізовані для використання в мобільних і стаціонарних антенних установках. У межах цієї мети передбачається створення схеми пристрою на базі мікроконтролера ATmega32U4, що має вбудований USB-інтерфейс, достатню кількість цифрових входів/виходів, а також можливість роботи з пристроями через інтерфейс I2C.

Контролер має забезпечувати керування двома кроковими двигунами за допомогою драйверів TB6600 через відповідні сигнальні лінії PUL+ та DIR+. Для організації ручного управління обертанням передбачено чотири кнопки, підключені через pull-down резистори до цифрових входів.

Візуалізація даних про положення антени реалізується за допомогою OLED-дисплея з інтерфейсом I2C, що працює на спільній шині з інерційним сенсором MPU6050, який використовується для вимірювання кута нахилу системи. Уся система передбачає автономну роботу від акумуляторів типу 18650, які заряджаються за допомогою модуля TP4056, а стабілізація вихідної напруги до рівня 5 В здійснюється за допомогою підвищувального перетворювача TPS61200.

Окремо важливим завданням є розробка програмного забезпечення для мікроконтролера, яке включає обробку сигналів з MPU6050, відображення інформації на дисплеї, обробку натискань кнопок і генерацію керуючих сигналів для драйверів двигунів.

Запропоноване рішення має на меті створення універсального і недорогого апаратно-програмного комплексу, який можна адаптувати до різних типів антен – зокрема, панельних, спрямованих чи саморобних Yagi-антен – і який може слугувати базою для подальшого розширення, наприклад, через інтеграцію бездротового керування або позиціонування за GPS-координатами.

Виклад основного матеріалу. У межах цього дослідження було розроблено пристрій контролю повороту антени на базі мікроконтролера ATmega32u4. Основна функціональна задача пристрою полягає в забезпеченні точного та стабільного управління напрямком антени в горизонтальній та вертикальній площинах. Конструкція пристрою передбачає реалізацію системи ручного та автоматичного керування, що дозволяє адаптувати його для використання в різних умовах, включаючи мобільні та стаціонарні комплекси.

Апаратна реалізація пристрою

Центральним елементом системи є мікроконтролер ATmega32u4, обраний завдяки своїй підтримці USB-з'єднання, вбудованому таймеру, широким можливостям для роботи з периферією, та достатньому обсягу пам'яті для зберігання прошивки.

На рисунку 4 зображено найменування та призначення виводів, варто звернути на рисунок увагу для кращого розуміння далі викладеного матеріалу. Управління кроковими двигунами, відповідальними за поворот антени по двох осях, реалізується за допомогою двох драйверів TB6600. Сигнали керування подаються через виводи PB4 та PB6 (напрям DIR+) і PB5 та PB7 (імпульси PUL+), що забезпечує незалежне двовісне позиціювання. Така конфігурація дає змогу з високою точністю встановлювати положення антени.

Інтерфейс ручного керування представлений двома кнопками, підключеними до виводів PD4 (BTN1) та PC6 (BTN2) з підключеними pull-down резисторами номіналом 10 кОм. Це дозволяє оператору здійснювати базове ручне позиціювання у випадках, коли автоматичне керування недоступне або не потрібне.

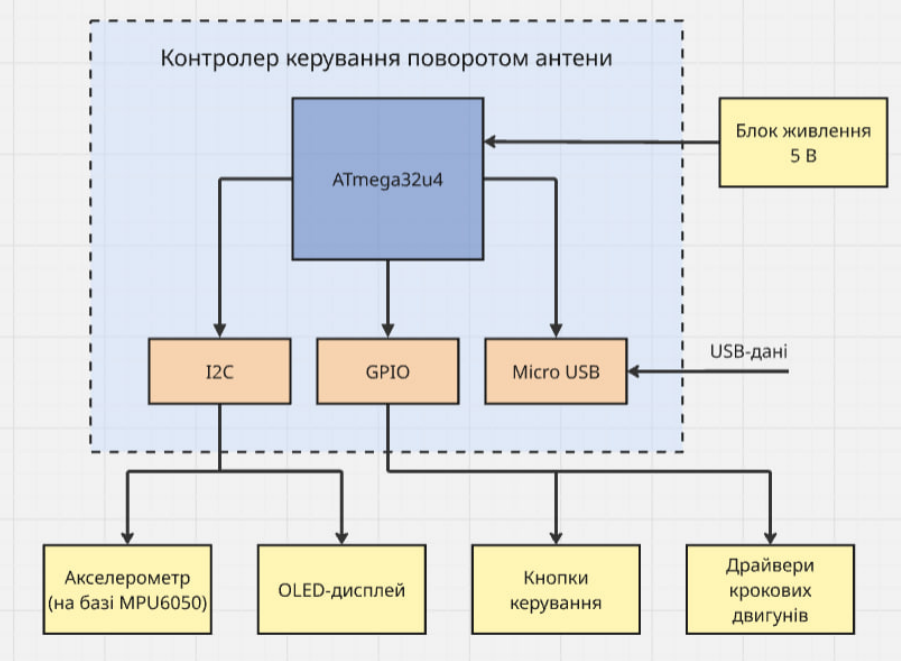


Рис. 3. Структурно-функціональна схема пристрою

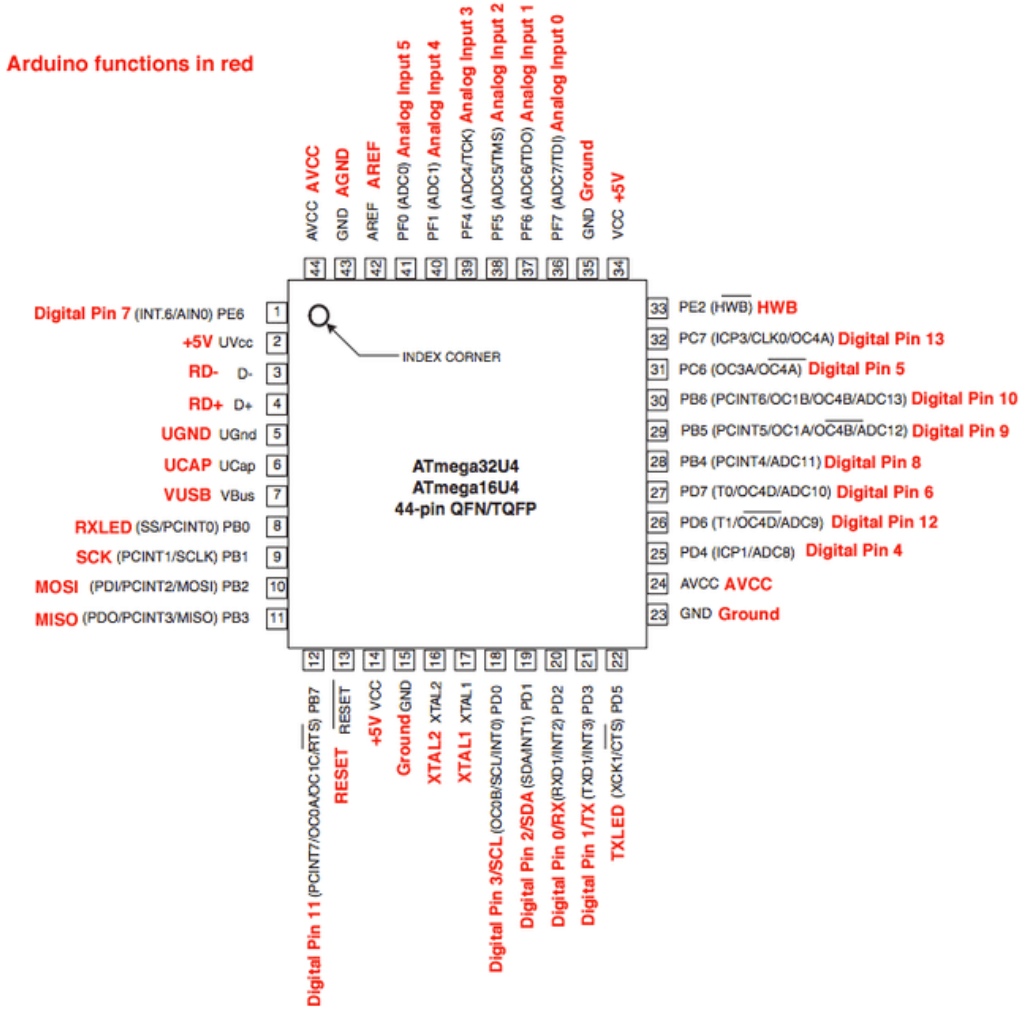


Рис. 4. Найменування та призначення виводів на мікроконтролері ATmega32u4

Для зворотного зв'язку щодо положення антени використано модуль акселерометра з підключенням до I2C-шини (PD1 – SDA, PD0 – SCL) та сигналом переривання на PD7. Акселерометр дозволяє не тільки відстежувати фактичне положення антени, а й фіксувати нештатні ситуації (наприклад, різке переміщення або вібрації), що підвищує надійність системи.

Інформаційний зворотній зв›язок користувачу реалізовано за допомогою OLED-дисплея, що підключається до тієї ж I2C-шини, що й акселерометр. На дисплеї виводиться поточне положення антени, стан акумулятора, режим керування (ручний/автоматичний) та службова інформація.

Живлення пристрою забезпечується модулем TP4056, який здійснює заряд двох паралельно з›єднаних акумуляторів типу 18650. Напруга з акумуляторів стабілізується за допомогою DC-DC перетворювача, що формує напругу 5В, необхідну для роботи мікроконтролера та периферійних модулів. Така система живлення дозволяє забезпечити автономну роботу пристрою в польових умовах.

Для стабільної роботи мікроконтролера використовується зовнішній кварцовий резонатор частотою 16 МГц, підключений до XTAL1 і XTAL2, що забезпечує необхідну точність таймінгів в обробці сигналів та передачі даних. Також передбачено кнопку скидання, підключену до виводу RESET.

Програмне забезпечення пристрою

Програмне забезпечення, написане на мові C з використанням бібліотек AVR, реалізує такі функції:

- ініціалізація та обслуговування I2C-шини для зчитування даних з акселерометра та керування OLED-дисплеєм;
- обробка сигналів з кнопок керування з програмною фільтрацією та захистом від дебаунсу;
- формування сигналів управління для драйверів TB6600 (імпульси, напрямок);
- обробка переривань від акселерометра та кнопок;
- відображення інформації на дисплеї;
- обробка комунікацій по USB для налаштування пристрою через ПК або оновлення прошивки.

Особливу увагу було приділено оптимізації коду з метою зменшення споживання енергії та стабільності роботи у польових умовах. В результаті розроблено ефективну та стабільну систему, здатну забезпечити точне управління антеною в реальному часі.

Розрахунок кута повороту антени

Основне рівняння:

$$\theta = N * \alpha, \quad (1)$$

де θ – кут повороту антени в градусах (°),

N – кількість поданих імпульсів на кроковий двигун,

α – кут повороту двигуна за один імпульс (у нашому випадку 1.8° на крок – типова характеристика для двигуна NEMA 17 у повному кроці).

Кожен імпульс, який надходить на драйвер TB6600, повертає вал двигуна на певний фіксований кут. Якщо двигун працює у повнокроковому режимі, то один імпульс дорівнює одному кроку, а отже:

- 1 імпульс → 1.8° повороту,
- 100 імпульсів → 180°,
- 200 імпульсів → повний оберт (360°).

Якщо ж драйвер працює в мікрокроковому режимі (наприклад, 1/8 мікрокроку), то α буде значно меншим:

$$\alpha = \frac{1.8°}{8} = 0.225° \quad (2)$$

Розрахунок сумарного струму споживання

Таблиця 1

Перелік компонентів та їх струмоспоживання

Компонент	Струм, мА
ATmega32u4 (в роботі)	25
OLED-дисплей (I2C)	20
MPU6050 акселерометр	5
Кроковий двигун (2 × 0.8 A) через TB6600	1600
TP4056 та DC-DC втрати	50
Разом (активний режим)	1700
Разом (очікування)	60

Струм споживання у часі при змішаному режимі

Пристрій працює в циклічному режимі: протягом кожних 10 хвилин:

- 3 хвилини – активна робота двигунів (струм споживання високий),
- 7 хвилин – очікування, OLED і мікроконтролер працюють у енергозберігаючому режимі (струм мінімальний).

Рівняння струму у часі $I(t)$:

Це періодична функція, яку можна записати умовно:

$$I(t)=\begin{cases} I_{активний}, & t\,mod\,10<3 \\ I_{очікування}, & інакше \end{cases}, \quad (3)$$

де $I(t)$ – струм у момент часу t,

t – час у хвилинах,

$I_{активний}$ = 1700 мА – споживання при русі (двигуни обертаються),

$I_{очікування}$ = 60 мА – споживання при простої (тільки дисплей і мікроконтролер).

Середнє споживання струму за цикл:

За один 10-хвилинний період:

$$I_{середній}=\frac{3*I_{активний}+7*I_{очікування}}{10}=$$

$$=\frac{3*1700\,мА+7*60\,мА}{10}=\frac{5520\,мА}{10}=552\,мА \quad (4)$$

Це значення може бути використане для оцінки ємності акумуляторів, тривалості автономної роботи тощо.

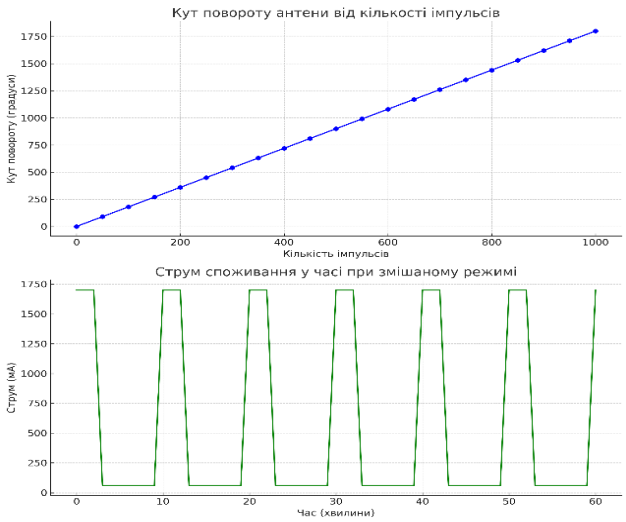


Рис. 5. Графік кута повороту антени від кількості імпульсів та графік споживання струму у часі

Розрахунок автономної роботи

При умові, що встановлено 2 акумулятори 18650 по 3000 мА·год → С=6000 мА·год

При змішананому режимі відповідно:

70% часу складає очікування (60 мА)

30% часу – активна робота (1700 мА)

Середнє споживання визначимо за формулою:

$$I_{серед}=0.7*60\,мА+0.3*1700\,мА=$$

$$=42\,мА+510\,мА=552\,мА. \quad (5)$$

Тривалість роботи складає:

$$t=\frac{6000}{552}\approx 10.87\,годин \quad (6)$$

Отже орієнтовно 10 годин 52 хвилини автономної роботи в змішаному режимі.

Результати експериментального дослідження

У ході тестування пристрою у лабораторних умовах було виявлено, що точність позиціювання антени становить ±1°, час реакції на команди – до 200 мс, а тривалість автономної роботи від повністю заряджених акумуляторів – до 12 годин у змішаному режимі (70% очікування, 30% активна робота). Дані результати демонструють відповідність пристрою вимогам до систем точного орієнтування, що використовуються в телекомунікаційних або наукових цілях.

Висновки. У даній роботі було розроблено прототип контролера керування поворотом антени на базі мікроконтролера ATmega32u4, що забезпечує точне позиціонування антени по горизонтальній та вертикальній осях. У процесі дослідження проведено аналіз компонентної бази, вибрано оптимальні драйвери керування кроковими двигунами (TB6600), розроблено схему підключення периферійних пристроїв – кнопок керування, OLED-дисплея, акселерометра, а також джерела живлення на базі TP4056 і DC-DC конвертера.

Експериментально доведено працездатність пристрою у змішаному режимі роботи, де досягнуто середнє енергоспоживання на рівні 552 мА, що дозволяє забезпечити тривалий час автономної роботи за допомогою двох акумуляторів типу 18650. Результати моделювання кінематики повороту (лінійна залежність кута від кількості імпульсів) відповідають очікуваним аналітичним розрахункам, що підтверджено побудовою відповідного графіка.

Основними перевагами запропонованого рішення є модульність, автономність, відносна простота реалізації та можливість використання в умовах, де присутність оператора є небажаною або неможливою (зокрема, у військовій сфері, зоні радіаційного зараження, або на віддалених ділянках).

Перспективою розвитку може бути інтеграція бездротових інтерфейсів (Wi-Fi, LoRa, Bluetooth) для повністю дистанційного керування, реалізація зворотного зв’язку за допомогою GPS або магнітометра для автоматичного наведення на ціль, оптимізація енергоспоживання шляхом використання енергоефективних режимів сну мікроконтролера.

Список літератури:

1. Self-steering Yagi-Uda antenna positioning system for television. URL: https://surl.li/dwydsa (дата звернення 25.05.2025)
2. IoT Based Antenna Positioning System. URL: https://ijarsct.co.in/Paper1456.pdf (дата звернення 25.05.2025)
3. Improving the Efficiency of the MPU-6050 Sensor Module for Inertial Drone Navigation. URL: https://surl.li/cumgsj (дата звернення 25.05.2025)
4. Implementation of Micro USB Charger TP4056 and Battery Indicator LED in Portable Solar Charge. URL: https://surl.li/usrlej (дата звернення 25.05.2025)
5. Android Based Antenna Positioning System. URL: https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/17287 (дата звернення 25.05.2025)

Antropov A.O., Gubar V.G. RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF CREATING AN ANTENNA ROTATION CONTROLLER

The article considers the concept of building a device that is an antenna rotation controller with the ability to control the position along two axes – horizontal and vertical.

The relevance of the development lies in the need to create a compact, autonomous and accurate device for remote control of the antenna position in conditions where direct access to it is difficult or dangerous. Such a system can find application in the fields of communications, radio engineering, monitoring, as well as in military equipment, where it is important to ensure control of the antenna direction without the presence of an operator.

This article considers the implementation of a device based on the ATmega32u4 microcontroller, which provides control of stepper motors via TB6600 drivers, data collection from an accelerometer to determine the antenna position, and information display on an OLED display. Additionally, a power module with the ability to operate autonomously from 18650 batteries has been implemented, the charge of which is controlled using the TP4056 module.

The main feature of the device is the ability to precisely position the antenna using an inertial sensor (accelerometer) and stepper actuators, which allows for deterministic control even in the absence of feedback from servomechanisms. The ability to manually control the antenna position via external buttons connected to the microcontroller ports is provided, which, in combination with a compact interface, ensures ease of use.

The article proposes an approach to building a device based on affordable and inexpensive components that can be scaled and modified for specific user tasks, including automatic signal tracking, satellite tracking, or directional communication in dynamic systems.

Key words: *antenna rotation controller, ATmega32u4, stepper motor, TB6600, accelerometer, autonomous power supply, remote control, positioning, user interface.*

УДК 621.314
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/58

Ромашко В.Я.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Батрак Л.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ВИХІДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛА НА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ

Вихідна потужність реальних джерел електричної енергії залежить від їх внутрішнього опору та опору навантаження. У випадку їх рівності вихідна потужність джерела досягає максимального значення – точка максимальної потужності (ТМП) джерела. Для отримання від джерела максимальної кількості електричної енергії, бажано, щоб у процесі роботи його робоча точка перебувала в ТМП. Однак положення робочої точки на вихідній характеристиці джерела впливатиме на його енергетичні показники, зокрема на коефіцієнт використання електричної енергії. Якщо внутрішній опір джерела є лінійним, в ТМП його коефіцієнт використання електричної енергії дорівнює 50%, що для традиційних джерел недопустимо. В нетрадиційних та відновлюваних джерелах внутрішній опір, як правило, є нелінійним. Метою роботи є аналіз впливу внутрішнього опору джерела та характеру його вихідної характеристики на енергетичні показники джерела, зокрема на можливість та доцільність відбирання від такого джерела максимально можливої потужності. В роботі розглянуто два типи нелінійних вихідних характеристик джерел електричної енергії, які відрізняються характером зміни вихідного опору при змінах опору навантаження. Визначались координати ТМП джерела і проаналізовано залежність коефіцієнта використання електричної енергії від координат його ТМП. Показано, що в залежності від типу нелінійної вихідної характеристики джерела його коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП може бути як більшим, так і меншим 50%. Відзначено, що при однаковій вихідній характеристиці, коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП для джерела струму та напруги можуть відрізнятися. Показано, що при змінах опору навантаження джерела відносно його опору в ТМП, вихідна потужність буде зменшуватись, а швидкість її зменшення залежатиме від типу вихідної характеристики джерела.

Ключові слова: *нелінійний внутрішній опір, вихідна характеристика джерела, коефіцієнт використання електричної енергії, відбирання максимальної потужності.*

Постановка проблеми. Теорія електричних кіл оперує з ідеалізованими джерелами струму та напруги. Припускають, що внутрішній опір джерела напруги $r = 0$. Тому вихідна напруга такого джерела не залежатиме від його вихідного струму і залишатиметься постійною. Вважають, що вихідна потужність таких джерел є необмеженою [1]. Реальні джерела електричної енергії характеризуються наявністю в них деякого внутрішнього опору r. Тому вихідна потужність таких джерел завжди обмежується величиною цього опору. Їх вихідна напруга не є постійною і залежатиме від величини вихідного струму. Цю залежність описує вихідна характеристика джерела $U_{out} = f(I_{out})$. У загальному випадку крайніми режимами роботи джерела є режими холостого ходу та короткого замикання. У цих двох крайніх режимах вихідна потужність джерела $P_{\text{out}} = 0$. В робочому режимі, який має місце між режимами холостого ходу і короткою замикання, вихідна потужність джерела буде змінюватись, досягаючи максимального значення в певній робочій точці. Ця точка на вихідній характеристика джерела називається його точкою максимальною потужності (ТМП) [2].

Для отримання від джерела максимальної кількості електричної енергії, бажано, щоб його робоча точка перебувала в ТМП. Однак, положення робочої точки на вихідній характеристиці джерела впливатиме на його енергетичні показники. Зокрема, на коефіцієнт використання електричної енергії $\eta = P_{out}/P_{sousce}$, який дорівнює відношенню вихідної потужності P_{out} до потужності P_{source}, яку при цьому розвиває джерело. Різниця цих потужностей виділятиметься на внутрішньому опорі джерела, спричиняючи його нагрівання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо [1], у випадку лінійного внутрішнього опору джерела, в ТМП коефіцієнт використання його енергії η = 50%, тобто половина енергії, що виробляється джерелом, розсіюється на його внутрішньому опорі. Для традиційних генераторів це недопустимо, внаслідок надмірного теплового режиму. Крім того, оскільки електричну енергію в традиційних джерелах отримують шляхом перетворення енергії певного енергоносія, який має відповідну вартість, його використання буде не ефективним. У зв'язку з цим, традиційні джерела електричної енергії, які переважно є джерелами напруги, працюють на ділянці вихідної характеристики з η > 0,8 … 0,9 [3].

В той же час для нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії вказані обмеження не є критичними. Часто енергоносій у відновлюваних джерелах є безкоштовним. Тому, навіть при порівняно невисокому η, від таких джерел доцільно намагатись відбирати максимально можливу потужність. Що стосується втрат енергії у самому джерелі, то багато нетрадиційних та відновлюваних джерел мають розподілену структуру і являють собою набір модулів порівняно невеликої потужності. У зв'язку з цим площа їх поверхності є достатньою для розсіювання тепла, що виділяється. Крім того, це тепло може бути використане у нетрадиційних джерелах електричної енергії типу термогенераторів [4, 5, 6, 7].

Більшість нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії мають нелінійний внутрішній опір. Відповідно вихідна характеристика таких джерел також є нелінійною. Причому ця нелінійність може бути різного виду.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз впливу внутрішнього опору джерела та характеру його вихідної характеристики на енергетичні показники джерела, зокрема на можливість відбирання від такого джерела максимально можливої потужності.

Виклад основного матеріалу. Якщо внутрішній опір джерела r є лінійним, його вихідний опір $r_{вих} = \Delta U_{вих} / \Delta I_{вих} = r$ і залишається постійним при змінах вихідного струму. Вихідна характеристика таких джерел являє собою пряму лінію, яка описується простим аналітичним виразом [8]

$$U_{вих} = U_{xx} - I_{вих} r, \qquad (1)$$

де U_{xx} – напруга холостого ходу джерела.

Якщо ж внутрішній опір джерела є нелінійним, його вихідний опір буде змінюватись при змінах вихідного струму. Найчастіше вольт-амперну характеристику (ВАХ) внутрішнього опору не вдається описати достатньо простим аналітичним виразом. В той же час вихідну характеристику джерела завжди можна визначити експериментально.

Маючи графік вихідної характеристики джерела (рис. 1а), ВАХ його внутрішнього опору r можна побудувати графічно (рис. 1б), використовуючи другий закон Кіргофа

$$U_{xx} = U_r(I) + U_R(I). \qquad (2)$$

Тому, подальший аналіз здійснюватимемо з використанням вихідних характеристик джерел електричної енергії. За необхідності, ВАХ внутрішнього опору завжди можна визначити графічно.

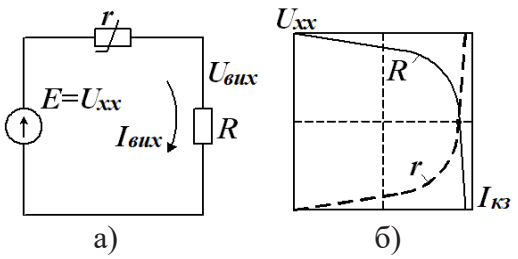


Рис. 1. Визначення ВАХ внутрішнього опору джерела напруги

Для спрощення аналізу і зручності практичного використання отриманих результатів, вихідні характеристики представлятимемо в нормованому вигляді у відносних одиницях (рис. 2) де $U^* = U / U_{xx}$, $I^* = I / I_{кз}$; U_{xx} та $I_{кз}$, відповідно напруга холостого ходу та струм короткого замикання джерела.

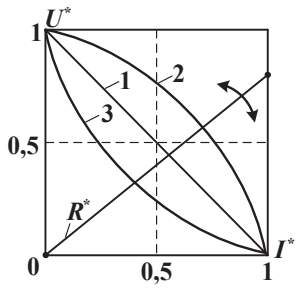


Рис. 2. Вихідні характеристики в нормованому вигляді

Проаналізуємо енергетичні характеристики джерел з трьома типами вихідних характеристик (рис. 2).

1. Лінійна вихідна характеристика, для якої при змінах опору навантаження R^*, вихідний опір джерела $r^*_{вих}$ залишається постійним.

2. Нелінійна вихідна характеристика, для якої зі зменшенням опору навантаження R^*, вихідний опір джерела $r^*_{вих}$ збільшується.

3. Нелінійна вихідна характеристика, для якої зі зменшенням опору навантаження R^*, вихідний опір джерела $r^*_{вих}$ також зменшується.

Особливістю нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії є те, що частина з цих джерел є джерелами напруги, а інша частина – джерелами струму. Крім того, дуже часто подібні джерела можуть працювати в широкому діапазоні зміни опору навантаження – практично від режиму холостого ходу до режиму короткого замикання. Подальший аналіз здійснюватимемо з урахування цих особливостей.

Лінійна вихідна характеристика 1-го типу

Пронормуємо по напрузі U_{xx} вихідну характеристику (1)

$$U / U_{xx} = 1 - Ir / U_{xx},$$

або

$$U^* = 1 - I^* \qquad (3)$$

де $U_{xx} / r = I_{кз}$.

Аналогічно, вихідна характеристика джерела струму матиме вигляд

$$I = I_{кз} - U / r. \qquad (4)$$

Пронормувавши по струму $I_{кз}$, одержимо вихідну характеристику джерела струму у відносних одиницях

$$I^* = 1 - U^*, \qquad (5)$$

де $I_{кз} r = U_{xx}$.

При роботі з нормованими характеристиками використовують нормований опір

$$R^* = U^* / I^* = \frac{U}{I} \cdot \frac{I_{кз}}{U_{xx}} = \frac{R}{r}. \qquad (6)$$

Очевидно, що нормоване значення внутрішнього опору джерела $r^* = r / r = 1$.

Використовуючи нормовані вихідні характеристики (3) та (5), опір навантаження джерела R^* можемо визначити, знаючи лише вихідну напругу джерела U^*або його вихідний струм I^*

$$R^* = U^* / I^* = U^* / (1 - U^*) = (1 - I^*) / I^*. \qquad (7)$$

Відповідно, знаючи опір навантаження джерела R^*, можемо визначити його вихідну напругу U^* або струм I^*. З урахуванням (7)

$$U^* = R^* / (1 + R^*);\ I^* = 1 / (1 + R^*) \qquad (8)$$

Оцінимо енергетичні характеристики джерела з лінійним внутрішнім опором. Вихідну потужність джерела P^*, можна визначити як

$$P^* = U^* I^* = U^* (1 - U^*) = (1 - I^*) I^*,$$

або

$$P^* = U^* - U^{*2} = I^* - I^{*2}. \qquad (9)$$

В ТМП вихідна потужність джерела досягає максимального значення. Для визначення координат ТМП визначимо похідну $P^{*\prime}$ і прирівняємо її до нуля

$$P^{*\prime} = 1 - 2U^* = 1 - 2I^* = 0. \qquad (10)$$

Отже координати ТМП джерела з лінійним внутрішнім опором

$$U^*_{МП} = 0.5;\ \ I^*_{МП} = 0.5. \qquad (11)$$

Визначимо коефіцієнт використання електричної енергії джерела для випадків, коли джерело енергії є джерелом напруги (рис. 3 а) та джерелом струму (рис. 3 б)

$$\left.\begin{aligned} \eta_E &= \frac{U^* I^*}{1 \cdot I^*} = U^*. \\ \eta_Э &= \frac{U^* I^*}{U^* \cdot 1} = I^*. \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Отже, коефіцієнт використання електричної енергії джерела напруги співпадає з його відносною вихідної напругою, а джерела струму – з його відносним вихідним струмом.

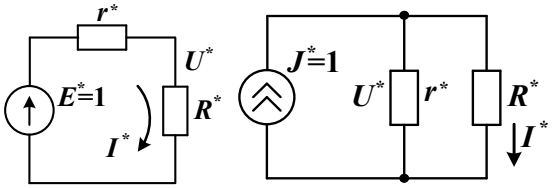


Рис. 3. а) джерело напруги, б) джерело струму

З урахуванням (11) робимо висновок, що при лінійному внутрішньому опорі як джерело напруги, так і джерело струму в ТМП мають $\eta_{ТМП} = 0.5$. Відмінність полягає в тому, що при $U^* > U^*_{МП}$ коефіцієнт η_E зменшуватиметься, а $\eta_Э$ зростатиме і навпаки.

Таким чином джерела струму та напруги з лінійним внутрішнім опором r матимуть однакову вихідну характеристику. Тому процеси у навантаженні таких джерел відрізнятися не будуть. В той же час внутрішні енергетичні процеси в самих джерелах, зокрема коефіцієнт використання електричної енергії, суттєво відрізнятимуться. На рис. 4 представлено графіки вихідної характеристики джерела з лінійним внутрішнім

опором $U^* = f(I^*)$, графік залежності вихідної потужності $P^* = f(I^*)$, а також графік залежності $P^*/P^*_{МП} = f(I^*)$, які ілюструють результати проведеного аналізу.

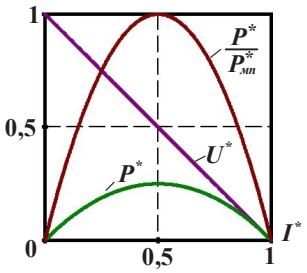


Рис. 4. Вихідна характеристика джерела з лінійним внутрішнім опором $U^* = f(I^*)$, залежності вихідної потужності $P^* = f(I^*)$ та $P^* / P^*_{МП} = f(I^*)$

Нелінійна вихідна характеристика 2-го типу

В принципі існує безліч вихідних характеристик такого типу. Щоб проаналізувати їх особливості, як приклад, розглянемо вихідну характеристику, що являє собою ділянку кола, яке описується достатньо простим нелінійним аналітичним виразом $U^{*2} + I^{*2} = 1$. Отже вихідна характеристика, яку аналізуємо

$$U^* = \sqrt{1 - I^{*2}}\ ;\ I^* = \sqrt{1 - U^{*2}}\ . \qquad (13)$$

Щоб отримати на виході такого джерела напругу U^*, опір навантаження R^* має бути

$$R^* = U^* / I^* = U^* \Big/ \sqrt{1 - U^{*2}}\ . \qquad (14)$$

Відповідно, щоб отримати вихідний струм I^*

$$R^* = U^* / I^* = \sqrt{1 - I^{*2}} \Big/ I^*\ . \qquad (15)$$

Якщо опір навантаження R^* відомий, з урахуванням (14) можна визначити вихідну напругу джерела

$$U^* = R^* \Big/ \sqrt{1 + R^{*2}}\ . \qquad (16)$$

Аналогічно, з урахуванням (15) можна визначити вихідний струм джерела

$$I^* = 1 \Big/ \sqrt{1 + R^{*2}}\ . \qquad (17)$$

Вихідна потужність джерела, з урахуванням (13)

$$P^* = U^* I^* = U^* \sqrt{1 - U^{*2}} = \sqrt{U^{*2} - U^{*4}}\ . \qquad (18)$$

Визначимо координату ТМП $U^*_{МП}$, в якій вихідна потужність досягає максимального значення $P^*_{МП}$. Очевидно, що в цій же точці досягає максимального значення і функція $P^{*2} = U^{*2} - U^{*4}$. Візьмемо похідну від цієї функції і прирівняємо її до нуля

$$\frac{dP^{*2}}{dU^*} = 2U^* - 4U^{*3} = 0\ .$$

Отже $2U^{*2} = 1$

$$U^*_{МП} = \sqrt{0.5} = 0.707\ . \qquad (19)$$

Аналогічно можна показати, що координата $I^*_{МП}$ також дорівнюватиме 0,707. Отже, для джерела з нелінійною вихідною характеристикою розглянутого типу, коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП $\eta_{МПТ} = 0.707$ і буде однаковим, як для джерела напруги, так і для джерела струму. На рис. 5 представлено графіки вихідної характеристики джерела, а також графіки зміни його вихідної потужності, які ілюструють результати проведеного аналізу.

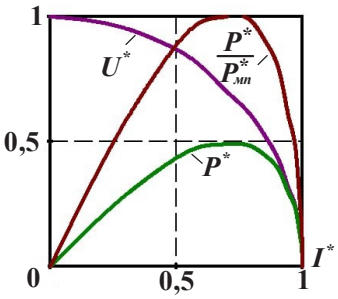


Рис. 5. Вихідна характеристика джерела та графік зміни вихідної потужності

Нелінійна вихідна характеристика 3-го типу

Як приклад, проаналізуємо вихідну характеристику, яка є симетричною до характеристики 2, відносно характеристики 1 (рис. 2). Ця характеристика також являє собою ділянку кола, яке описується наступним аналітичним виразом

$$\left(1 - U^*\right)^2 + \left(1 - I^*\right)^2 = 1. \qquad (20)$$

Отже, вихідні характеристики цього джерела будуть такими

$$U^* = 1 - \sqrt{1 - \left(1 - I^*\right)^2}\ ;\ I^* = 1 - \sqrt{1 - \left(1 - U^*\right)^2}\ . \qquad (21)$$

Наведені аналітичні вирази вихідної характеристики можна проаналізувати аналогічно до характеристики 2. Однак цю процедуру можна спростити. Введемо заміну $U_* = 1 - U^*$; $I_* = 1 - I^*$. При такій заміні формули для вихідних характеристик 2-го та 3-го типу матимуть однаковий вигляд. Отже, формули, отримані для характеристики 2, після відповідної заміни будуть дійсними і для характеристики 3.

Зокрема, відповідно до (19), координати ТМП для характеристики 3 $U_{*МП} = 0.707$; $I_{*МП} = 0.707$. Переходячи до дійсних параметрів отримуємо

$$1-U^*_{МП}=0.707;\ 1-I^*_{МП}=0.707.$$

Отже

$$U^*_{МП}=1-0.707=0.293;\ I^*_{МП}=1-0.707=0.293. \quad (22)$$

Відповідно, для джерела з розглянутою вихідною характеристикою, в ТМП коефіцієнт використання електричної енергії $\eta_{МПТ}=0.293$ і буде однаковим для джерела напруги та джерела струму. На рис. 6 представлено графіки вихідної характеристики джерела, а також графіки зміни його вихідної потужності при зміні вихідного струму.

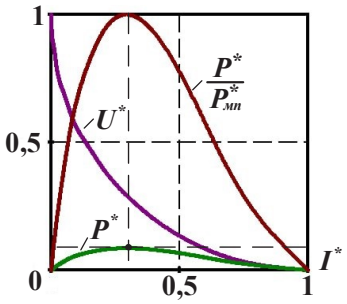


Рис. 6. Вихідна характеристика джерела та графік зміни вихідної потужності

Для джерел з розглянутими вихідними характеристиками, в ТМП коефіцієнт використання електричної енергії буде однаковим, як для джерела напруги, так і струму. Введемо параметр – опір навантаження в ТМП

$$R^*_{МП}=U^*_{МП}/I^*_{МП}\ . \quad (23)$$

Для розглянутих характеристик $R^*_{МП}=1$. Зауважимо, що для джерел з лінійним внутрішнім опором $R^*_{МП}$ завжди дорівнює одиниці, тобто $R = r$. В той же час, для джерел з нелінійним внутрішнім опором, він може приймати різні значення, як більші, так і менші за одиницю. А це означає, що коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП буде різним для джерела струму та напруги. Якщо $R^*_{МП}>1$, $\eta_E>\eta_Э$. Якщо ж $R^*_{МП}<1$, $\eta_E<\eta_Э$. Наприклад, координати ТМП сонячної батареї приблизно дорівнюють $U_{МП}\approx 0.8$; $I^*_{МП}\approx 0.9$ [9, 10, 11]. Отже $R^*_{МП}\approx 0.8/0.9\approx 0.89<1$. Оскільки за своїм фізичним принципом дії сонячна батарея є джерелом струму, її коефіцієнт використання електричної енергії в ТМП $\eta_Э\cong 0.9$.

Таким чином, на відміну від ідеальних, реальні джерела напруги та струму можуть мати однакову вихідну характеристику. У цьому випадку процеси в навантаженні джерела напруги та струму відрізнятися не будуть. В той же час енергетичні процеси в самих джерелах відрізнятимуться суттєво. Зокрема, при наближенні до режиму холостого ходу $\eta_E\to 1$, а $\eta_Э\to 0$, а при наближенні до режиму короткого замикання $\eta_E\to 0$, а $\eta_Э\to 1$. Отже, коефіцієнт використання електричної енергії джерела в будь-якій робочій точці, у загальному випадку, залежатиме від того, що являє собою це джерело – джерело струму чи напруги.

Як зазначалося, джерело досягає ТМП за певної величини опору навантаження $R^*_{МП}$. При збільшенні або зменшенні R^* відносно $R^*_{МП}$ вихідна потужність джерела зменшуватиметься. Нехай допустимим є зменшення вихідної потужності на 10% відносно $P^*_{МП}$

$$\frac{P^*_{МП}-P^*}{P^*_{МП}}=0.1.$$

Аналіз показує, що для джерел з різними типами вихідної характеристики допустима зміна опору R^* буде відрізнятися. В табл. 1 наведено чисельні значення максимально і мінімально допустимого опору R^*_{max} та R^*_{min}, а також допустимий діапазон його зміни $\Delta R^*=R^*_{max}-R^*_{min}$, за якого вихідна потужність джерела зменшиться не більше ніж на 10% відносно $P^*_{МП}$.

Таблиця 1

Допустима зміна опору навантаження *R**

Вихідна характеристика	R^*_{max}	R^*_{min}	ΔR^*
Нелінійна 2	1.6	0.65	0.95
Лінійна 1	1.85	0.55	1.3
Нелінійна 3	2.3	0.43	1.87

З табл. 1 випливає, що найменша допустима зміна опору R^* відповідає джерелам з вихідною характеристикою 2 типу, а найбільша – 3-го типу. Джерела з лінійною вихідною характеристикою 1-го типу займають проміжне положення. Це пов'язано з тим, що для характеристик 2-го типу зі зменшенням опору навантаження R^*, вихідний опір джерела зростатиме. Тому ТМП, для якої $R = r_{вих}$, буде пройдена швидше. Для характеристик 3-го типу зі зменшенням опору навантаження вихідний опір джерела також зменшуватиметься. Тому вихідна потужність джерела змінюватиметься повільніше. Очевидно, що для різних видів характеристик одного типу, допустимий діапазон зміни R^* буде відрізнятись. Наприклад, для вихідної характеристики джерела, яка описується експоненціальною функцією, допустимий діапазон

дорівнює $\Delta R^* = 2.31$. Таким чином, для забезпечення роботи джерела в околиці ТМП, при вихідних характеристиках 2-го типу допустима зміна опору навантаження є мінімальною, а для характеристик 3-го типу максимальною.

Проаналізовані вихідні характеристики описуються достатньо простими аналітичними виразами. Однак багато реальних нетрадиційних та відновлюваних джерел мають нелінійні вихідні характеристики, для описання яких необхідно використовувати значно складніші аналітичні вирази [12, 13, 14].

У зв'язку з цим вихідну характеристику джерела часто визначають експериментально. У таких випадках для дослідження цих джерел доцільно використовувати графоаналітичні методи. Методика досліджень може бути такою.

Шляхом зміни опору навантаження встановлюємо взаємозв'язок між вихідною напругою та струмом джерела $U_{вих} = f(I_{вих})$. У процесі вимірювань заповнюємо табл. 2.

Для кожної з n робочих точок обчислюємо опір навантаження, який відповідає цій робочій точці $R_i = U_i / I_i$, а також вихідну потужність $P_i = U_i I_i$.

Аналізуючи отримані результати виявляємо ТМП джерела, а також опір навантаження $R_{МП} = U_{МП} / I_{МП}$, за якого джерело живлення перебуватиме в ТМП.

Для спрощення аналізу отриманих результатів і можливості узагальнень, вихідну характеристику, а також опори та потужність доцільно представляти в нормованому вигляді. Крім того, таке представлення спрощує розрахунок узгоджувального імпульсного регулятора для забезпечення відбирання максимальної потужності від джерела в широкому діапазоні змін опору навантаження [15].

Таблиця 2

Результати вимірювань

U	Uxx	U1	U2	…	Uмп	…	Un-1	Un	0
I	0	I1	I2	…	Iмп	…	In-1	In	Iкз
R=U/I	∞	R1	R2	…	Rмп	…	Rn-1	Rn	0
P=UI	0	P1	P2	…	Pмп	…	Pn-1	Pn	0

Висновки. В джерелах струму та напруги з лінійним внутрішнім опором координати ТМП є однаковими $U^*_{МП} = I^*_{МП} = 0.5$. При цьому коефіцієнт використання електричної енергії джерела $\eta_E = \eta_Э = 50\%$.

В джерелах електричної енергії з нелінійним внутрішнім опором координати ТМП по струму та напрузі можуть відрізнятися. У таких випадках коефіцієнт використання електричної енергії джерела струму та напруги матимуть різні значення.

В джерелах з нелінійною вихідною характеристикою 2-го типу в ТМП коефіцієнт використання електричної енергії, як правило, більше 50%, а з характеристикою 3-го типу – менше 50%.

В ТМП опір навантаження джерела $R^* = R^*_{МП}$. При змінах опору R^* відносно $R^*_{МР}$ вихідна потужність джерела зменшуватиметься. Швидкість зменшення вихідної потужності dP^* / dR^* буде найбільшою для джерел з нелінійною вихідною характеристикою 2-го типу і найменшою для джерел з характеристикою 3-го типу.

Список літератури:

1. Панченко С.В., Ананьєва О.М., Бабаєв М.М. та ін. Теорія електричних і магнітних кіл: підручник. 2-ге вид. Харків, 2020. 246 с. ISBN 978-617-654-135-6.
2. Baba A.O., Liu G., Chen X. Classification and evaluation review of maximum power point tracking methods. *Sustainable Futures*. 2020. Vol. 2. Article ID: 100020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100020
3. Glisson T.H. Introduction to Circuit Analysis and Design. Dordrecht, 2011. 768 p.
4. Patel J., Singh M. Thermoelectric Generators. *Open Science Journal.* 2021. URL: https://surl.li/unumtp
5. Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management.* 2017. Vol. 140. P. 167–181. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070.
6. Tang Z.B., Deng Y.D., Su C.Q., Shuai W.W., Xie C.J. A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2015. Vol. 5. P. 143–150. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.03.006.
7. Fernández-Yáñez P., Romero V., Armas O., Cerretti G. Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 196. Article ID: 117291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291.
8. Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Г., Панасенко М.В., Ромашко В.Я., Руденко В.С. Перетворювальна техніка: підручник. У 2 ч. Ч. 2. Харків, 2000. 360 с. ISBN 966-03-0697-0.
9. Ромашко В.Я., Батрак Л.М., Абакумова О.О. Регулювальна характеристика понижувального імпульсного регулятора, який заряджає батарею від сонячної батареї. *Електротехніка та електромеханіка*. 2020. № 2. С. 64–67. DOI: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.10.

10. Вербицький Є.В., Ромашко В.Я. Особливості знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї методами холостого ходу та короткого замикання. *Електроніка та зв'язок.* 2013. № 5(76). С. 13–18. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/9948.

11. Faranda R., Leva S. Energy comparison of MPPT techniques for PV systems. *WSEAS Transactions on Power Systems*. 2008. Vol. 3, № 5. P. 446–455. URL: https://surl.li/bfxhly

12. Rahma E., Brahim B., Smail M. A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV Systems. *Studies in Engineering and Exact Sciences.* 2024. Vol. 5, № 2. e11181. DOI: https://doi.org/10.54021/seesv5n2-577.

13. Farzinnia M., Farhadi-Kangarlu M. Application of an Exact MPPT Method to Track the Global Maximum Power Point of PV Arrays. *Proc. of 10th Iranian Conf. on Renewable Energy & Distributed Generation* (ICREDG2023), Shahrood, Iran. 2023. URL: https://surl.lu/urrmnj

14. Álvarez J.M., [et al.] Analytical modeling of current-voltage photovoltaic performance: an easy approach to solar panel behavior. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 9. Article ID: 4250. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/app11094250.

15. Ромашко В.Я., Батрак Л.М. Особливості роботи імпульсних регуляторів у режимі максимального відбору потужності: монографія. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»; Дніпро: Середняк Т.К., 2024. 162 с. ISBN 978-617-8139-54-4.

Romashko V.Ya., Batrak L.M. THE INFLUENCE OF THE SOURCE'S OUTPUT CHARACTERISTICS ON ITS ENERGY PERFORMANCE

The output power of real sources of electric energy depends on their internal resistance and load resistance. In the case of their equality, the output power of the source reaches its maximum value – the maximum power point (*MPP*) *of the source. To obtain the maximum amount of electric energy from the source, it is desirable that its operating point be in the MPP during operation. However, the position of the operating point on the source output characteristic will affect its energy indicators, in particular, electrical energy utilization factor. If the internal resistance of the source is linear, in the MPP its electrical energy utilization factor is 50%, which is unacceptable for traditional sources. In non-traditional and renewable sources, the internal resistance is usually nonlinear. The goal of the work is to analyze the influence of the internal resistance of the source and the nature of its output characteristic on the energy indicators of the source, in particular, on the possibility and feasibility of extracting the maximum possible power from such a source. The work considers two types of nonlinear output characteristics of electric energy sources, which differ in the nature of the change in output resistance when the load resistance changes. The coordinates of the MPP of the source were determined and the dependence of the electrical energy utilization factor, on the coordinates of its MPP was analyzed. It is shown that depending on the type of nonlinear output characteristic of the source, its electrical energy utilization factor, in the MPP can be either greater or less than 50%. It is noted that with the same output characteristic, the electrical energy utilization factor, in the MPP for the current and voltage source may differ. It is shown that when the load resistance of the source changes relative to its resistance in the MPP, the output power will decrease, and the rate of its decrease will depend on the type of output characteristic of the source.*

Key words: *nonlinear internal resistance, source output characteristic, electrical energy utilization factor, maximum power extraction.*

Відомості про авторів

Аніщенко Г.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Антропов А.О. – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бараннік В.В. – аспірант кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки

Барановський Д.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Батрак Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Береговий Т.О. – аспірант хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бєлянська О.Р. – кандидат технічних наук, доцент, викладач загальних дисциплін Кам'янського вищого професійного училища

Бобронніков А.С. – аспірант 1 року навчання кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бондаренко А.В. – кандидат технічних наук, доцент Національного університету «Одеська морська академія»

Бондаренко С.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ботяков А.В. – аспірант кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Національного транспортного університету

Ващенко В.В. – кандидат економічних наук, начальник відділу Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Ветошко І.П. – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воінов О.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції Одеської державної академії будівництва та архітектури

Воробйов М.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старший науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

Ганчарський М. – керуючий партнер Hydrogenium P.S.A. (Simple Joint Stock Company) у Любліні, Польща

Гарбуз А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Гарист А.В. – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Гаркавенко О.А. – студентка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гаценко К.В. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Гілевич В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Глуховський В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гнідой Р.І. – аспірант кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Одеського національного морського університету

Гончаренко М.О. – магістрант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Грицун В.М. – старший науковий співробітник Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Губар В.Г. – старший викладач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губар В.Г. – старший викладач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гусаров В.М. – провідний інженер лабораторії теплометрії Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Гусарова О.В. – кандидатка технічних наук, старша викладачка кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старша наукова співробітниця відділу тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Дабіжа Н.О. – кандидатка технічних наук, старша наукова співробітниця відділу тепломасопереносу в теплотехнологіях Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Демидюков О.В. – аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Дира В.В. – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

Дмитренко Н.В. – кандидатка технічних наук, старша наукова співробітниця відділу тепломасопереносу в теплотехнологіях Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Дубовкіна І.О. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Елькін Ю.Г. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри теплогазопостачання та вентиляції Одеської державної академії будівництва та архітектури

Єнчев С.В. – доктор технічних наук, завідувач кафедри автоматизації та енергоменеджменту Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Єфименко В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Єфімова В.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Жуков Р.О. – аспірант кафедри електричних машин електротехнічного факультету Національного університету «Запорізька політехніка»

Заверкін А.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Зайцева І.С. – кандидат хімічних наук, доцент, доцентка Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Затірка О.І. – машиніст турбінного устаткування філії «Відокремлений підрозділ «Рівненська атомна електрична станція» АТ «Національна атомна енергогенеруюча компанія «ЕНЕРГОАТОМ»

Золотарьова О.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Іваненко Н.П. – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу прогнозування енергетичної ефективності та перспективних паливно-енергетичних балансів Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

Іваненко Р.О. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного Інституту спеціальної техніки та судових експертиз

Кириченко О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету

Кисельов В.Б. – доктор технічних наук, професор, директор Навчально наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Кіріс О.В. – кандидат технічних наук, доцент Національного університету «Одеська морська академія»

Коваленко І.Л. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології неорганічних речовин ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Козирєв І.П. – кандидат технічних наук, доцент Національного університету «Одеська морська академія»

Колесник В.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Колесник В.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету

Компанієць В.О. – старший викладач, аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Конкін В.М. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Конохов В.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Костенко О.І. – завідувач сектору Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Кравченко О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Кравчук С.О. – професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кривда Р.В. – магістр кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Кузьменко С.В. – кандидат технічних наук, доцент, виконуючий обов'язки декана факультету транспорту і будівництва Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Курилко О.Б. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інтегральних та диференціальних рівнянь Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Кучеренко В.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Лавінський Д.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Лебедев Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев Д.Ю. – доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Левченко С.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Літачевський В.В. – аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Ловська А.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Логвіненко О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту

Луцак Д.С. – магістр кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Малахов О.В. – доктор фізико-математичних наук, професор Національного університету «Одеська морська академія»

Малащук Н.С. – доктор філософії в галузі технічних наук, наукова співробітниця відділу тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Малиновський В.В. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій

Матвєєва О.Л. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Мельник В.Ю. – кандидат технічних наук, доцент Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету

Мельник Л.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мельник О.М. – доктор технічних наук, професор кафедри судноводіння і морська безпека Одеського національного морського університету

Мирончук А.О. – аспірантка Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Мініна Ю.О. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Мітіна Н.Б. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій

Мурад'ян А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Найдьонов А.І. – кандидат технічних наук, доцент Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Никитюк П.В. – старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

Ніколаєва Л.Л. – доктор технічних наук, професор Національного університету «Одеська морська академія»

Новосад Ю.І. – аспірант кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Овдієнко П.К. – студент І курсу групи ДК-41мп кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Овчаренко А.О. – старший науковий співробітник Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Омецинская Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Опанасенко О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Будівельна механіка та гідравліка» Українського державного університету залізничного транспорту

Орлик В.М. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту газу Національної академії наук України

Осадчук О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Осадчук Я.О. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Павлюченков М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри будівельних конструкцій Сумського національного аграрного університету

Палагін О.М. – кандидат технічних наук, доцент Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Панайотова Т.Д. – кандидат хімічних наук, доцент, доцентка Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Пастух О.В. – старший викладач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету

Петренко В.І. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Петрик О.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних машин електротехнічного факультету Національного університету «Запорізька політехніка»

Петров С.В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту газу Національної академії наук України

Пешко В.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пилипенко О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Півторак Г.В. – кандидатка технічних наук, доцентка кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Поліщук М.М. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пріступа С.В. – старший викладач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету

Просвєт Ю.Д. – курсант 312 навчальної групи Національної академії Національної гвардії України

Пустовойтов П.Є. – доктор технічних наук, професор кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Редько І.В. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Риндюк Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рой Е. – доктор технічних наук, професор дослідницької мережі Лукасевича Інституту нового хімічного синтезу у Пулави, Польща

Ромашко В.Я. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сангинова О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сепік А.В. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сірко З.С. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Скиба Ю.М. – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скиба М.І. – доктор технічних наук, професор ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скощук В.К. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Скуйбіда Є.Л. – аспірант кафедри мехатроніки та пакувальної техніки Навчально-наукового інженерно-технічного інституту ім. акад. І. С. Гулого Національного університету харчових технологій

Слободян О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри авіоніки та систем управління Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Смирнов О.О. – кандидат технічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса»

Смірнов Ю.О. – кандидат економічних наук, доцент Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України

Столянов В.А. – аспірант кафедри експлуатації флоту та технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Столяренко Г.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Строкова Т.М. – заступник завідувача лабораторією Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Суслов В.В. – аспірант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Тараненко С.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету

Тачинін Є.В. – начальник відділу АТ «Антонов»

Тачиніна О.М. – доктор технічних наук, завідувач кафедри авіоніки та систем управління Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Тимофеєв Є.М. – аспірант кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткач М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трофімов І.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Фисун В.В. – викладач кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України

Фомін О.В. – доктор технічних наук, професор кафедри вагонів та вагонного господарства Національного транспортного університету

Холденко В.І. – старший викладач кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету

Чередник В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету

Черненко П.В. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України

Черноусенко О.Ю. – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чижик В.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики факультету транспортних систем Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Чуков О.О. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чумак В.Л. – доктор хімічних наук, професор, професор кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Шапенко Є.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Шаповал В.М. – здобувачка освіти другого (магістерського) рівня освіти Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Швець М.Д. – кандидат технічних наук, доцент Національного університету водного господарства та природокористування

Шелешей Т.В. – кандидат технічних наук, старша викладачка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шпак Н.Г. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Шпилюр П.С. – аспірант Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

Юсипів Т.В. – доктор філософії, асистент кафедри інтегральних та диференціальних рівнянь механіко-математичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

НОТАТКИ

Науковий журнал

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 3 2025

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Т. Клименко*

Адреса редакції:
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33
Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua
Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60 × 84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 39,62. Ум. друк. арк. 57,32. Зам. № 0925/720
Підписано до друку 30.06.2025. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.