

**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) № 4 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 технологій 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 загальноінженерних 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 № 1 від 29 серпня 2025 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
zareєстровано 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

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Павленко В.Я. СЕРТИФІКАЦІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ.....	1
Фомін О.В., Козинка О.С., Мельник О.М., Зеленський О.В., Сущенко Р.В. ВИКОРИСТАННЯ ЕЛАСТОМЕРІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ВІД ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ВАНТАЖНИХ ВАГОНАХ.....	8
Чайковський С.Ю. БАГАТОШАРОВІ ДРУКОВАНІ ПЛАТИ ТА ЇХ ПЕРЕВАГИ.....	18

ПРИЛАДИ

Бандурка Л.М. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛЮДИНИ.....	24

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Білевський П.С. ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ РЕГУЛЯТОРІВ НАПРУГИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ МІКРОСИСТЕМ.....	31
Ikhsanov Sh.M., Diakonov O.S. IMPLEMENTATION OF A REAL DATA TRANSMISSION CHANNEL BASED ON A SINGLE ADALM-PLUTO SDR PLATFORM.....	38
Касілов О.В., Дмитрук К.С. МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В РОСВІЙ МЕРЕЖІ ДРОНІВ.....	53
Катін П.Ю., Вишневий С.В. АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СКЛАДОВОЇ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА БАЗІ ПАТЕРНУ «СПОСТЕРІГАЧ».....	62
Корчинський В.М., Тимченко О.С. ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ МЕТОД СУМІЩЕННЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ	69
Пустовойтов П.С., Клавдієв В.П. СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ МАСШТАБУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ПРОЦЕСУ ВІНЕРА ДЛЯ ХМАРНИХ ІНФРАСТРУКТУР.....	76
Савченко М.В., Меркуленко Ю.С. Q-LEARNING І МАРКОВСЬКА ОПТИМІЗАЦІЯ: АДАПТИВНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ СПЕКТРОМ У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ.....	85
Сокол Г.В., Ковда Є.О. МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНИХ ВУЗЛІВ НА МАС-РІВНІ.....	91
Явіся В.С., Гуйда О.Г. ШЛЯХИ ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОСТОРОВИМ ПОЛОЖЕННЯМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ.....	99

ЕНЕРГЕТИКА

Абдулін М.З., Хмара П.П., Шахбазов І.О. ОЧИЩЕННЯ ВИХІДНИХ ГАЗІВ СМІТТЕСПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ В ТОПКАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОТЛІВ.....	107
Алексєйк Є.С., Ніколаєнко Ю.Є., Кравець В.Ю., Руденко О.І., Мельник Р.С. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ З НАРІЗНИМ ВИПАРНИКОМ ПРИ ЗМІННОМУ КУТІ НАХИЛУ.....	114

Баранюк О.В., Черноусенко О.Ю., Рачинський А.Ю., Пікенін О.О. МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРУ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ В КОТЛІ ТИПУ ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).....	124
Бовсуновський О.А. ГРАНИЧНИЙ СТАН ВАЛОПРОВОДА ПАРОВОЇ ТУРБИНИ К-1100-60/1500-2М ПРИ НЕШТАТНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА	134
Коценко О.А. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В УПРАВЛІННІ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯМ ОСВІТНІХ ЗАКЛАДІВ	143
Пешко В.А., Коновалюк О.Л. ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ПУСКУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН РОТОРА ТУРБИНИ К-200-130.....	149
Політикін М.В. МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У СИСТЕМІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОКВАРТИРНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ.....	157
Ткаченко М.В., Риндюк Д.В. ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ НА БАЗІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ.....	165
Усов І.Л., Шелешей Т.В. ПРОЦЕСИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО СТУПЕНЕВОГО ЗГОРЯННЯ У КОНТЕКСТІ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ НА ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ.....	178
Харитонов Ю.М., Поберій М.В. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ МІСЬКИХ АГЛОМЕРАЦІЙ.....	185

МЕТАЛУРГІЯ

Волошин В.С., Ткаленко І. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВЗАЄМОДІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ ПРИ ЇХ РЕЦИКЛІНГУ.....	191

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Букет О.І., Бутенко О.С. УСУНЕННЯ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОХІМІЧНІЙ СИСТЕМІ СЕНСОРА РОЗЧИНЕНОГО У ВОДІ КИСНЮ.....	200
Коваль М.Г. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ФАРБУВАЛЬНО-ОПОРЯДЖУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	207
Михайлов Д.О., Штефан В.В., Кануннікова Н.О. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМАТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОСАДЖЕННЯ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ.....	213
Мігіна Н.Б., Мініна Ю.О., Овчаренко С.В. ДІАГНОСТИКА СТАНУ ҐРУНТІВ, ЩО ЗАЗНАЛИ ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ.....	219
Павловський Д.О., Левандовський І.А. ОЦІНКА СТРУКТУРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ВИРОБІВ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ І ПОЛІКАРБОНАТУ ПІД ДІЄЮ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	227
Пилипенко Т.М., Єфімова В.Г., Єднак А.Ю. РОЗРОБКА КОМПОЗИЦІЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМУЛЬСІЙНИХ КОСМЕТИЧНИХ ПРОДУКТІВ.....	233
Столяренко Г.С., Коваль М.Г., Солодовнік Т.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ МЕМБРАН ПРИ ОБЕЗСОЛЮВАННІ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД.....	238
Чигиринець О.Е., Мамренко О.С. КОРОЗІЯ ТЕРМОДИФУЗІЙНОГО ЦИНКОВОГО ПОКРИТТЯ У ІМІТОВАНОМУ СІРКОВОДНЕВОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	246

Шульга І.В., Мещанін В.І., Котляров Є.І., Карєв А.І., Лебедєв В.В. ТЕРМОХІМІЧНА ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ.....	253
Яременко В.В., Чорний О.О., Федоренко В.В., Гой А.М., Гурєєва С.М., Лісовий В.М. ПОКРАЩЕННЯ РОЗЧИНЕННЯ МАЛОРОЗЧИННИХ АКТИВНИХ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРОТИЗАПАЛЬНОЇ ДІЇ МЕТОДОМ СПІЛЬНОГО ПОДРІБНЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ НОСІЯМИ.....	260
ТРАНСПОРТ	
Абрамова Л.С., Абрамова О.С., Птиця Г.Г. ІНТЕГРАЦІЯ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ДОРОЖНЬОГО РУХУ.....	272
Вікович І.А., Обшта А.Ф., Приходько В.Е. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ОДНОЛАНКОВИМИ АВТОПОЇЗДАМИ В ТРАНСПОРТНИХ КОРИДОРАХ США	280
Галкін А.С., Самчук Г.О., Лифенко С.Е., Скрипін В.С. ПРОСТОРОВО-МЕРЕЖЕВИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ПАСАЖИРІВ НА ЗУПИНОЧНИХ ПУНКТАХ.....	287
Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. ПРИВАТИЗАЦІЯ ПОРТІВ: РИЗИКИ, РЕГУЛЯТОРНІ МЕХАНІЗМИ ТА СТРАТЕГІЧНІ АЛЬТЕРНАТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ.....	295
Ловська А.О., Рибін А.В., Мурад'ян А.О., Волошин І.О. АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА З ОБШИВКОЮ, УТВОРЕНОЮ ПРЯМОКУТНИМИ ГОФРАМИ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗАЛІЗНИЧНИМ ПОРОМОМ	302
Онищенко С.П., Мельник О.М., Бондаренко Ю.А., Присяжнюк А.М. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СУДЕН-КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ НА ЛІНІЇ З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ.....	309
Петров Л.М., Петрик Ю.М., Борисенко Т.М. ТЕОРІЯ Л.М. ПЕТРОВА З ДОДАТКАМИ ПЕТРИКА ТА БОРИСЕНКА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕОРЕМИ ЕЙЛЕРА-ШАЛЯ ДЛЯ КОЛІСНОГО РУШІЯ АВТОМОБІЛЯ.....	316
Хітров І.О. ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КУЗОВА ВАНТАЖНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА БЕЗПЕКУ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ.....	324
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	330

CONTENTS

INDUSTRIAL ENGINEERING

Pavlenko V.Ya.

CERTIFICATION AS A TOOL FOR IMPROVING PRODUCT QUALITY.....1

Fomin O.V., Kozynka O.S., Melnyk O.M., Zelenskyi O.V., Sushchenko R.V.

APPLICATION OF ELASTOMERS FOR REDUCING STRESS FROM DYNAMIC LOADS
IN FREIGHT WAGONS..... 8

Chaikovskiy S.Yu.

MULTILAYER PRINTED CIRCUIT BOARDS AND THEIR ADVANTAGES.....18

EQUIPMENT

Bandurka L.M.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM FOR MONITORING
HUMAN CONDITION..... 24

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Bilevskiy P.S.

OPTIMIZATION OF VOLTAGE REGULATOR SCHEMES FOR MICROSYSTEM POWER SUPPLY...31

Ikhsanov Sh.M., Diakonov O.S.

IMPLEMENTATION OF A REAL DATA TRANSMISSION CHANNEL
BASED ON A SINGLE ADALM-PLUTO SDR PLATFORM.....38

Kasilov O.V., Dmytruk K.S.

MODEL OF DYNAMIC LOAD BALANCING IN A SWARM NETWORK OF DRONES..... 53

Katin P.Yu., Vyshneviy S.V.

SOFTWARE ARCHITECTURE OF THE RADIO SYSTEMS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE
ELEMENTS BASED ON THE “OBSERVER” PATTERN.....62

Korchynskiy V.M., Tymchenko O.S.

OPTIMIZATION METHOD FOR COMBINING MULTI-CHANNEL INFORMATION SIGNALS.....69

Pustovoitov P.Ye., Klavdiiev V.P.

STOCHASTIC MODEL OF TELECOMMUNICATION NETWORK SCALPING
BASED ON THE WINER PROCESS FOR CLOUD INFRASTRUCTURES.....76

Savchenko M.V., Merkulenko Yu.S.

Q-LEARNING AND MARKOV OPTIMIZATION: ADAPTIVE APPROACHES TO SPECTRUM
MANAGEMENT IN COGNITIVE RADIO NETWORKS.....85

Sokol H.V., Kovda Ye.O.

METHOD FOR DETECTION OF UNAUTHORIZED NODES AT THE MAS LEVEL..... 91

Yavisya V.S., Guida O.H.

WAYS OF OBTAINING INFORMATION FOR SPATIAL POSITION CONTROL SYSTEMS
OF SPACECRAFT.....99

POWER ENGINEERING

Abdulin M.Z., Khmara P.P., Shakhbazov I.O.

PURIFICATION OF EMISSION GAS OF INCINERATION FURNISHERS IN THE FIREPLACES
OF ENERGY BOILERS.....107

Alekseik Ye.S., Nikolaenko Yu.Ye., Kravets V.Yu., Rudenko O.I., Melnyk R.S.

DETERMINATION OF THE FILLING RATIO OPTIMAL VALUE OF A GRAVITY HEAT PIPE
WITH A THREADED EVAPORATOR AT VARIABLE INCLINATION ANGLE.....114

Baranyuk O.V., Chernousenko O.Yu., Rachynskiy A.Yu., Pikenin O.O.

MODELING OF THE NATURAL CIRCULATION CIRCUIT IN THE GM-50 BOILER
(N-50-3.9-440GM).....124

Bovsunovsky O.A. LIMIT STATE OF THE STEAM TURBINE K-1100-60/1500-2M SHAFT AT ABNORMAL OPERATING MODE OF A TURBOGENERATOR.....	134
Kotsenko O.A. INFORMATION TECHNOLOGIES IN HEAT CONSUMPTION MANAGEMENT OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS.....	143
Peshko V.A., Konovaliuk O.L. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF START-UP TECHNOLOGY ON THE STRAIN-STRESS STATE OF THE K-200-130 TURBINE ROTOR.....	149
Politykin M.V. MODELING THE INTERACTION OF A HEAT PUMP AND A SOLAR POWER PLANT IN THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF AN APARTMENT BUILDING.....	157
Tkachenko M.V., Ryndiuk D.V. FEATURES OF HEATING AND AIR CONDITIONING SYSTEMS BASED ON HEAT PUMPS.....	165
Usov I.L., Sheleshei T.V. LOW-TEMPERATURE STAGED COMBUSTION PROCESSES IN THE CONTEXT OF REDUCING NO _x EMISSIONS AT THERMAL POWER PLANTS.....	178
Kharytonov Yu.M., Poberii M.V. INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR OPTIMIZING HEATING SYSTEMS IN URBAN AGGLOMERATIONS.....	185

METALLURGY

Voloshyn V.S., Tkalenko I. METHODOLOGY FOR ASSESSING THE INTERACTION OF METALLURGIC WASTE DURING THEIR RECYCLING.....	191

CHEMICAL TECHNOLOGY

Buket O.I., Butenko O.S. ELIMINATION OF OSCILLATORY PROCESSES IN THE ELECTROCHEMICAL SYSTEM OF A SENSOR FOR OXYGEN DISSOLVED IN WATER	200
Koval M.G. MODERN APPROACHES TO WASTEWATER TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY DYEING AND FINISHING PRODUCTION.....	207
Mykhailov D.O., Shtefan V.V., Kanunnikova N.O. CURRENT STATE OF THE PROBLEMATICS OF THE TECHNOLOGY OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF CHROMIUM COATINGS.....	213
Mitina N.B., Minina Yu.O., Ovcharenko S.V. DIAGNOSIS OF THE CONDITION OF SOILS AFFECTED BY COMBAT ACTIONS.....	219
Pavlovsky D.O., Levandovsky I.A. ASSESSMENT OF STRUCTURAL STABILITY OF PRODUCTS MADE OF POLYPROPYLENE AND POLYCARBONATE UNDER THE ACTION OF AQUEOUS ENVIRONMENT.....	227
Pylypenko T.M., Yefimova V.G., Yednak A.Yu. DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS AND STUDY OF EMULSION COSMETIC PRODUCTS.....	233
Stolyarenko H.S., Koval M.G., Solodovnik T.V. RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF MEMBRANES IN THE DESALIZATION OF HIGHLY MINERALIZED WATERS.....	238
Chyhyrynets O.E., Mamrenko O.S. CORROSION OF THERMODIFFUSION ZINC COATING IN A SIMULATED HYDROGEN SULFIDE ENVIRONMENT.....	246
Shulga I.V., Meshchanin V.I., Kotlarov Ye.I., Kariiev A.I., Lebedev V.V. THERMOCHEMICAL PROCESSING OF POLYETHYLENETEREPHTALATE WASTE.....	253

Yaremenko V.V., Chornyi O.O., Fedorenko V.V., Goy A.M., Gureyeva S.M., Lisovyi V.M. ENHANCEMENT OF DISSOLUTION OF POORLY SOLUBLE ANTI-INFLAMMATORY ACTIVE PHARMACEUTICAL INGREDIENTS BY CO-GRINDING WITH POLYMERIC CARRIERS.....	260

TRANSPORT

Abramova L.S., Abramova O.S., Ptytsia H.H. INTEGRATION OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS INTO ROAD SAFETY MANAGEMENT.....	272
Vikovych I.A., Obshta A.F., Prykhodko V.E. ECONOMIC EFFICIENCY OF FREIGHT TRANSPORTATION BY SINGLE-TRACK TRUCKS IN US TRANSPORT CORRIDORS	280
Galkin A.S., Samchuk G.O., Lyfenk S.E., Skrypin V.S. SPATIAL-NETWORK APPROACH TO PASSENGER SAFETY ASSESSMENT ON STOPS.....	287
Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu. PORT PRIVATIZATION: RISKS, REGULATORY MECHANISMS, AND STRATEGIC ALTERNATIVES FOR UKRAINE.....	295
Lovska A.O., Rybin A.V., Muradian A.O., Voloshyn I.O. ANALYSIS OF THE STRENGTH OF AN OPEN WAGON BODY WITH A LINING FORMED BY RECTANGULAR CORRUGATIONS DURING TRANSPORTATION BY RAIL FERRY.....	302
Onyshchenko S.P., Melnyk O.M., Bondarenko Yu.A., Prisyazhnyuk A.M. ASSESSMENT OF THE CONTAINER SHIPS EFFICIENCY TAKING INTO ACCOUNT THE CONTAINER FLOWS UNCERTAINTY	309
Petrov L.M., Petryk Yu.M., Borisenko T.M. L.M. PETROV'S THEORY WITH APPENDICES BY PETRYK AND BORYSENKO USING THE EULER-SCHAL THEOREM FOR THE WHEEL PROPULSION OF A CAR.....	316
Khitrov I.O. THE IMPACT OF STRUCTURAL FEATURES OF A FREIGHT VEHICLE BODY ON CARGO TRANSPORTATION SAFETY.....	324
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	330

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 005.6 : 658.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/01>**Павленко В.Я.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

СЕРТИФІКАЦІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Перехід до ринкової економіки і комерційної діяльності в сфері виробництва призвели до різкого збільшення кількості самостійних виробництв, ослабленню державного контролю за якістю та безпекою виробів, і, як наслідок, до збільшення ризиків виготовлення та продажу неякісної продукції. На сьогоднішній день, в умовах ринкових відносин, коли усім підприємствам і організаціям надано право самостійного виходу на зовнішній ринок, вони стикаються з проблемою оцінки якості і надійності своєї продукції. Міжнародний досвід свідчить про те, що необхідним інструментом, який би гарантував відповідність продукції вимогам нормативно-технічної документації (НТД) є сертифікація.

Існує багато традиційних методів і засобів забезпечення якості і безпеки продукції, але саме сертифікація є ключовим фактором забезпечення довіри при взаємному постачанні продукції а також рішенні таких глобальних соціальних задач як гарантія безпеки виготовленої продукції, охорона здоров'я і майна громадян, захист оточуючого середовища.

Сертифікація здійснюється з ціллю: допомоги споживачам в компетентному виборі продукції; захисту споживачів від недоброякісної продукції; контролю безпеки продукції для оточуючого середовища, життя, здоров'я і майна; підтвердження показників якості продукції, заявлених виробником.

В статті розглянуто основні положення сертифікації та визначено її вплив на якість продукції. Розтлумачено послідовність процедур в ході отримання сертифікату на продукцію. Окреслено особливості сертифікації в Україні та проаналізовано моделі впливу третьої сторони.

Ключові слова: сертифікація, стандартизація, управління якістю, технічний регламент, випробування, експертиза, третя сторона.

Постановка проблеми. В умовах насиченого товарами ринку продукції споживачу недостатньо заяв виробника і продавців про відповідність якості продукції вимогам стандартів. Йому необхідно гарантування незалежною (третьою) стороною підтвердження відповідності продукції необхідному рівню якості. Таке підтвердження може бути надано шляхом впровадження спеціальної процедури – сертифікації. Насамперед це стосується комерційної діяльності, яка існує в умовах жорсткої конкуренції і успішність її залежить від конкурентоздатності виробів. Особливого значення сертифікація набуває в міжнародній торгівлі, так як при наявності сертифікатів, особливо міжнародних, іноземний замовник отримує гарантію належної якості продукції, яка відповідає міжнародному рівню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механізмами функціонування національної системи стандартизації, сертифікації та ідентифікації товарів і послуг в Україні неухильно займаються вітчизняні вчені М. Шаповал, В. Павлов, О. Мишко, І. Опьонова, Н. Павліха, Н. Мережко [3, 4, 6].

Ю. Чалюк досліджує найкращі світові практики у розбудові цифрової економіки, їхній вплив на трансформацію ринку праці та формування професійних навичок майбутнього [5]. Варто звернути увагу на дослідження А. Бояра щодо сертифікації продукції в промисловості [7].

Сучасні дослідження підтверджують важливість ефективного використання сертифікації, стандартизації та управління якістю. Водночас є потреба подальшого вдосконалення існуючих напрацювань.

Постановка завдання. Перш ніж продукція потрапить у продаж, вона повинна пройти безліч перевірок, тим самим підтвердивши свою придатність до використання. Однією із форм подібних перевірок є «сертифікація» про яку піде мова у даній статті. Сертифікат якості (сертифікат відповідності) може бути як добровільним так і обов'язковим документом, і видається незалежним органом з сертифікації після проведення оцінки відповідності продукції визначеним вимогам. Слід звернути увагу, що після введення в Україні Закону «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» обов'язкова сертифікація була скасована, проте на заміну їй почала діяти обов'язкова відповідність Технічним регламентам.

Метою статті є визначення ролі сертифікації і стандартизації в управлінні якістю продукції. Проведення аналогії між обов'язковою сертифікацією та відповідністю технічним регламентам а також визначення важливості третьої сторони в системі сертифікації України.

Виклад основного матеріалу Введення вітчизняних комерційних підприємств в систему ринкової економіки України змінило сферу під впливом якої знаходиться система управління якістю організацій будь-яких форм власності. В Україні діє «Закон про захист прав споживачів» [1] – саме цей документ є базою сертифікації, її основою. Завдяки цьому правовому акту встановлені зобов'язання виробника перед споживачем, які передбачають створення умов для діяльності підприємств на товарному ринку України, для участі в міжнародному співробітництві і міжнародній торгівлі. Клієнт стає більш вимогливим і, як результат, менеджери організацій в більшій чи меншій мірі інтенсивності починають підлаштовуватись під нові умови, підшукуючи методами спроб і помилок вихід із ситуації, що склалася. Був знайдений єдиний вихід – зміна філософії ведення бізнесу; змінення організаційної культури; впровадження тотальної системи управління якістю продукції; регулювання процесів стандартизації і сертифікації рядом законодавчих актів, які стосуються даної сфери діяльності підприємства. Для розуміння ознайомимося з основними визначеннями в системі управління якістю продукції.

Стандартизація – це процес формування стандартів, механізм забезпечення відносин між різними зацікавленими сторонами, який дозволяє їм розробляти єдині вимоги за допомогою єдиної мови спілкування – іншими словами – це інструмент управління якістю на державному та міжна-

родному рівнях [12; 14]. *Метою стандартизації* є – забезпечення раціонального використання природних ресурсів; визначення відповідності об'єктів вимогам стандартизації та їх функціональному призначенню; інформування споживачів про якість продукції, процесів та послуг; підтримка розвитку і міжнародної конкурентоспроможності продукції та торгівлі товарами. *Об'єктами стандартизації* є продукція, послуги і процеси [12; 13].

З 1993 року в Україні почала формуватися система стандартизації та сертифікації. Був прийнятий Декрет Кабінету Міністрів України «Про стандартизацію і сертифікацію» і у 1994 році був розроблений та затверджений ДСТУ 2462-94¹, який визначав основні поняття у сфері сертифікації. На той час діяла система обов'язкової сертифікації продукції, яка була відома як УкрСЕПРО². Однак ця система поступово змінювалася на систему технічних регламентів (цей перехід відбувався впродовж кількох років). Загалом, з 1 січня 2018 року державна система обов'язкової сертифікації в Україні припинила своє існування, а на зміну їй прийшла система технічних регламентів, яка ґрунтується на європейській практиці. Усі ці зміни були викликані відкриттям внутрішнього ринку для торговельного приватного бізнесу і насиченням України продукцією із країн ближнього та дальнього зарубіжжя. Якщо в державних закупках продукції обов'язкову участь приймали експерти-товарознавці, які із зразків, представлених різними фірмами-виробниками, вибирали якісний товар (не обов'язково самий кращий, але вартий своєї ціни), то мета приватного підприємця – «купити дешевше, продати дорожче» – не завжди збігалася з вимогами до якості і безпеки продукції. Тому держава для захисту внутрішнього ринку від небезпечної для споживача продукції прийняла низку законів, стандартів та інших нормативних документів, а саме: Закон України «Про захист прав споживачів» (1991 р.) [9]; Закон України «Про підтвердження відповідності» (започаткований у 2004 р.) [16]; Закон України «Про стандартизацію» [8]; Державні стандарти та інші нормативні документи, які встановлювали вимоги до продукції та процесів. Але усі ці законодавчі акти були фрагментованими та

¹ ДСТУ 2462-94 «Сертифікація. Основні поняття. Терміни та визначення» втратив чинність. Наразі діє ДСТУ EN 45020:2017 «Загальні терміни та визначення, що стосуються стандартизації та суміжних видів діяльності», який є перекладом європейського стандарту EN 45020:2006.

² Державна система сертифікації – українська національна система сертифікації, роботи в якій визначали 149 органів з сертифікації продукції (робіт, послуг) та 811 випробувальних лабораторій (центрів). Діяла з 1996 року, втратила чинності 10.02.2016 року.

часто суперечили один одному. Тому у 2015 році був прийнятий Закон України № 124-VIII «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» який мав на меті уніфікувати та систематизувати законодавство у сфері технічного регулювання та оцінки відповідності, адаптувати його до європейських норм і стандартів, а також забезпечити ефективну систему захисту прав споживачів і безпеки продукції. Цей закон визначає правові та організаційні засади розробки, прийняття та застосування технічних регламентів, а також процедур оцінки відповідності, що включає сертифікацію [10].

Розвиток сертифікації в загальному економічному просторі різних держав має на увазі взаємне визнання результатів сертифікації продукції, яке засноване на гармонізації законодавчої бази, використанні єдиних стандартів і взаємно визнаних механізмів встановлення відповідності.

Сертифікація – це документальне підтвердження відповідності продукції певним вимогам, конкретним стандартам або технічним умовам, іншими словами – це процес, в ході якого заявник підтверджує, що його продукція відповідає вимогам безпечного і якісного використання. *Сертифікація продукції* – це необхідний комплекс заходів, які проводяться з метою підтвердження відповідності за допомогою сертифіката (документа), згідно якому продукція відповідає стандартам або іншій НТД [15]. Сертифікація виникла у зв'язку з необхідністю захисту внутрішнього ринку від продукції непридатної до використання. Питання безпеки, захисту здоров'я і оточуючого середовища змушують законодавчу владу – з однієї сторони, встановлювати відповідальність постачальника (виробника, продавця, тощо) за введення в обіг недоброякісної продукції; з другої сторони – встановлювати обов'язкові до виконання вимоги, що стосуються характеристик продукції, яка вводиться в обіг. Таким чином встановлюється обмеження на введення в обіг продукції, яка в цілому або по якимось окремим параметрам потрапляє під дію законодавчих актів (при цьому говорять, що продукція потрапляє в законодавчо регульовану область). Якщо ж характеристики продукції в цілому або частково не підпадають під дію національних законів, то така продукція може вільно реалізовуватись в межах відповідного ринку (при цьому говорять, що продукція потрапляє в законодавчо не регульовану область).

Застосування сертифікації продукції українськими підприємствами в умовах ринкових відносин надає наступні переваги: забезпечує довіру

внутрішніх і зарубіжних споживачів до якості продукції; полегшує і спрощує вибір продукції, необхідної споживачам; забезпечує споживачам отримання об'єктивної інформації щодо якості продукції; сприяє стабільному успіху і захисту в конкуренції з виробниками несертифікованої продукції; зменшує імпорту в країну продукції, аналогічної вітчизняній; запобігає надходженню в країну імпортованої продукції, яка не відповідає встановленому рівню якості; стимулює покращення якості НТД шляхом встановлення в ній більш прогресивних вимог.

Вся сертифікаційна діяльність здійснюється у відповідній системі, що володіє власними правилами і керівними документами. Систему сертифікації продукції можна класифікувати за різними класифікаційними ознаками, які представлені на рисунку 1.

Національна сертифікація – це процес підтвердження відповідності вимогам, встановленим національним законодавством та стандартами конкретної країни. В Україні, наприклад, це може бути підтвердження відповідності продукції вимогам технічних регламентів та стандартів, що діють на території України. В якості національного органу із сертифікації в Україні є Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), який виконує функції національного органу стандартизації, а також координує діяльність у сфері сертифікації.

Регіональна система сертифікації продукції створюється в межах певного географічного або економічного регіону, де діють спільні стандарти та вимоги. Наприклад, в Європейському Союзі діє регіональна система сертифікації, яка охоплює країни-члени ЄС. В рамках Європейської економічної комісії ООН на регіональному рівні функціонує приблизно 100 систем и угод із сертифікації.

Міжнародна сертифікація – це система сертифікації продукції створена на рівні ряду країн із будь-яких регіонів світу урядовою міжнародною організацією. Комітет ISO із сертифікації розробив рекомендації з організаційними принципами сертифікації продукції, на основі яких повинні діяти національні системи сертифікації. Якщо вони відповідають вимогам ISO, то видані ними сертифікати визнаються іншими країнами – членами ISO. В противному випадку продукція піддається додатковим сертифікаційним випробуванням за рахунок постачальника.

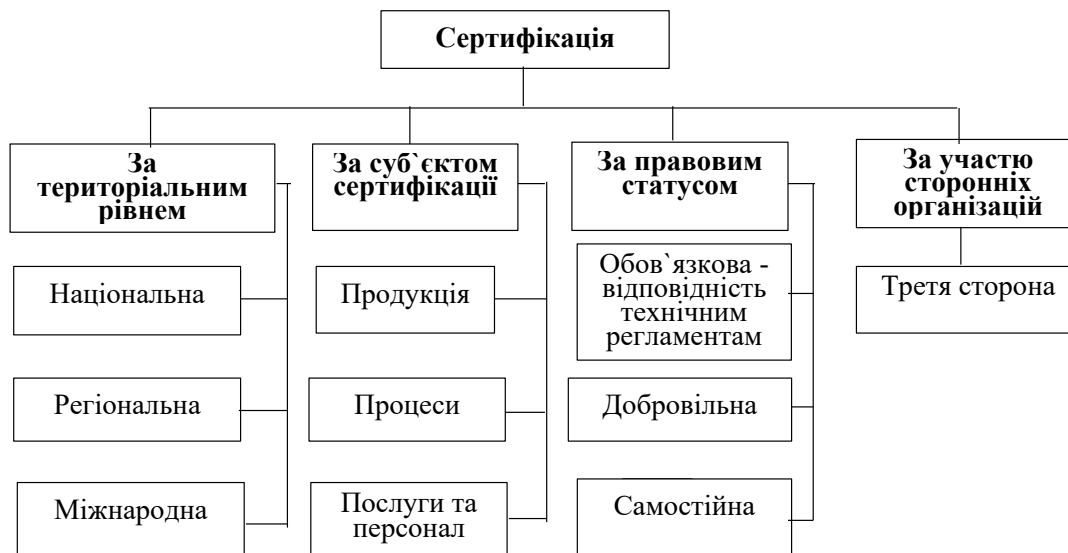


Рис. 1

Як уже говорилося, з 2018 року в Україні скасовано обов'язкову сертифікацію, але натомість діє обов'язкове підтвердження відповідності продукції *технічним регламентам*. Це означає, що певні види продукції (наприклад, електрообладнання, засоби індивідуального захисту, тощо), та певні вимоги, які стосуються безпеки, якості, енергоефективності, екологічних вимог та інших характеристик продукції, потребують підтвердження відповідності вимогам технічних регламентів затверджених державою і регулюються Законом України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [10]. Це підтвердження може включати сертифікацію, але може також бути у формі декларації відповідності або інших форм, передбачених технічними регламентами.

Технічний регламент – це нормативно-правовий акт, який містить обов'язкові вимоги до продукції, процесів або послуг, а також процедури оцінки відповідності. Затверджуються вони постановами Кабінету Міністрів України або наказами відповідних міністерств. Їм підлягає широкий перелік продукції яка визначена конкретними технічними регламентами (перелік її (продукції) можна знайти на сайті Міністерства економіки України у розділі «Технічне регулювання»). Там же можна знайти інформацію про органи з оцінки відповідності, які видають необхідні документи. В Україні існує понад 70 технічних регламентів, які затверджені Кабінетом Міністрів, та близько 11, які затверджені наказами міністерств.

Інформація щодо відповідності технічним регламентам на продукцію міститься в декла-

рації про відповідність та сертифікаті відповідності, які видаються для підтвердження того, що продукція відповідає встановленим вимогам конкретного стандарту чи іншого нормативного документу, визначеного чинним законодавством. Також, у деяких випадках, відповідність може підтверджуватись іншими документами, такими як звіти, висновки, свідоцтва, або такі, що підтверджують виконання заданих вимог. Виробник несе відповідальність за відповідність продукції технічним регламентам, і саме він повинен забезпечити наявність необхідних документів, що підтверджують цю відповідність. Тобто без наявності необхідних документів виробник не має права не тільки реалізовувати, а й виготовляти продукцію. Технічні регламенти, в свою чергу, визначають, які саме документи потрібні для конкретного виду продукції.

Процес забезпечення відповідності технічним регламентам складається з чотирьох етапів:

1 етап – *визначення відповідних технічних регламентів*. Виробник повинен визначити, яким технічним регламентам підлягає його продукція.

2 етап – *проведення оцінки відповідності*. Виробник або уповноважений представник повинен виконати процедури оцінки відповідності, які можуть включати випробування, сертифікацію або інспектування.

3 етап – *складання декларації про відповідність*. Після успішного проходження оцінки відповідності, виробник складає декларацію про відповідність, яка підтверджує відповідність продукції вимогам технічних регламентів.

Послідовність процедур сертифікації продукції

№пп	Зміст процедури	Виконавець
1.	Подання заявки на сертифікацію	З
2.	Прийняття рішення щодо заявки, в т.ч. вибір схеми	ОС
3.	Відбір, ідентифікація зразків і їх випробування	ОС; ВЛ або ВЦ
4.	Оцінка виробництва (якщо це передбачено схемою сертифікації)	ОС
5.	Аналіз отриманих результатів і прийняття рішення щодо видачі сертифіката відповідності	ОС
6.	Видача сертифіката і ліцензії на застосування знака відповідності	ОС
7.	Здійснення інспекційного контролю за сертифікованою продукцією	ОС
8.	Коригувальні заходи при порушенні відповідності встановленим вимогам і неправильне застосування знака відповідності	З
9.	Інформація щодо результатів сертифікації	ОС

З – заявник; ОС – орган із сертифікації; ВЛ – випробувальна лабораторія; ВЦ – випробувальний центр

4 етап – *нанесення знаку відповідності*. Зазвичай, після складання декларації про відповідність, на продукцію наноситься відповідний знак.

Для успішного проведення процесу сертифікації насамперед необхідно встановити послідовність процедур, тим самим виключивши можливі недоліки та упущення в роботі. Послідовність процедур представлена в таблиці 1.

Згідно класичній схемі, випробування зразків продукції здійснюють випробувальні лабораторії. Результати випробувань, оформлені у вигляді протоколу, передаються тим чи іншим способом в органи із сертифікації. При цьому випробувальна лабораторія не має права ні тлумачити, ні розголошувати отримані дані. Орган із сертифікації порівнює результати випробування з вимогами законодавства (якщо продукція потрапляє в регульовану законодавством область) або з іншими представленими характеристиками, нормативами, документами, тощо. В разі, якщо продукція відповідає вказаним встановленим вимогам, орган із сертифікації надає постачальнику сертифікат відповідності.

В залежності від вибраної схеми, взаємовідносини суб'єктів сертифікації можуть не закінчитися на етапі видачі сертифіката. Міжнародною організацією стандартизації ISO розроблено вісім схем (моделей) сертифікації третьою стороною.

1. *Випробування зразків продукції*. В першій моделі передбачається випробування зразка промислової продукції підприємства-виробника в незалежній випробувальній лабораторії або випробувальному центрі.

2. *Випробування зразків продукції із забезпеченням наступного періодичного контролю* (мається на увазі подальший контроль заводських зразків закуплених на відкритому ринку). В другій моделі передбачається довгостроковий

контроль за якістю. Це забезпечує проведення вибіркового випробування продукції в процесі реалізації.

3. *Випробування зразків продукції з подальшим контролем на основі нагляду за заводською продукцією*. Ця схема застосовується при наявності прямого зв'язку виробника і споживача без послуг посередницьких організацій (іншими словами періодичні випробування зразків в процесі реалізації замінені контролем їх у виробництві).

4. *Випробування зразків продукції з подальшим контролем на основі нагляду за зразками придбаними на відкритому ринку і отриманими від виробника*. Ця схема об'єднує методики другої і третьої моделей і передбачає контроль зразків продукції і в процесі виробництва і в процесі реалізації. Спеціалісти в області контролю вважають її найбільш універсальною.

5. *Випробування зразків продукції і оцінка заводського управління якістю з подальшим контролем на основі нагляду і випробуванням зразків, отриманих від виробника і придбаних на відкритому ринку*. Ця модель передбачає створення на підприємстві виробника системи якості, в якій якість контролюється на всіх етапах розробки виробництва продукції, дотримується суворя технологічна дисципліна, вхідний і операційний контроль, що знижує вірогідність браку. Цю модель спеціалісти вважають найбільш жорсткою.

6. *Оцінка тільки заводського управління*. Шоста модель розвиває і доповнює п'яту, забезпечуючи високу ефективність системи якості підприємства, і виключає необхідність випробувань в незалежних лабораторіях і центрах.

7. *Перевірка партій виробів*. Сьома модель орієнтована на проведенні всеосяжних випробувань в незалежних лабораторіях. Перевіряються усі експлуатаційні параметри із урахуванням

безпеки, ергономічності, екологічного впливу та інших показників, контроль є вибірковим.

8. *100%-вий контроль*. Ознайомившись з усіма схемами можна зробити висновок, що орган із сертифікації може самостійно, або доручивши іншій організації здійснювати поточний нагляд за виробництвом постачальника і характеристиками продукції і в разі отримання негативних результатів анулювати виданий раніше сертифікат відповідності.

Крім обов'язкового підтвердження відповідності технічним регламентам, існує також добровільна сертифікація. *Добровільна сертифікація продукції в Україні* – це процес, коли виробник, імпортер або постачальник на добровільних засадах підтверджує відповідність своєї продукції встановленим вимогам, підвищуючи її конкурентоспроможність та довіру споживачів. Вона проводиться для продукції, що не підлягає відповідності технічним регламентам, або як додатковий інструмент до обов'язкових вимог щодо підтвердження якості продукції та залучення клієнтів.

Важливим інструментом підвищення якості є *самостійна сертифікація*. Це вид добровільної сертифікації при якому компанія або виробник підтверджує відповідність своєї продукції певним стандартам, технічним умовам або вимогам зазначеним в іншій НТД, не маючи обов'язку це робити згідно з законодавством. Це робиться за власною ініціативою, щоб підвищити довіру споживачів, отримати конкурентну перевагу або виконати вимоги певних контрактів чи замовлень.

Згідно визначенню, наданому в міжнародних документах ISO/IEC 17000:2020, ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2019 – *сертифікація відповідності* – це процес, за допомогою якого незалежний орган (третя сторона) підтверджує, що продукція, послуги, процеси, системи або персонал

відповідають встановленим вимогам, описаним у стандартах, технічних регламентах або інших нормативних документах [11; 15]. Як правило, в НТД повинні бути обговорені властивості продукції, які вважаються суттєвими для споживача та вказані методи необхідні для підтвердження цих властивостей. Суть роботи органів із сертифікації полягає в тому, щоб перевірити, чи відповідає об'єкт сертифікації заданим критеріям і у разі позитивного результату, видати сертифікат відповідності.

Система сертифікації продукції *третьою стороною* створюється сторонньою організацією, яка перевіряє, оцінює та підтверджує відповідність виготовленої продукції НТД. Це може бути аудиторська перевірка у виробника, випробування у незалежній лабораторії чи випробувальному центрі, тощо. При отриманні в процесі сертифікації позитивного результату видається документ «сертифікат відповідності», який підтверджує, що продукція, система якості, система управління якістю, система управління довкіллям, або персонал відповідає встановленим вимогам конкретного стандарту або іншого нормативного документа, визначеного чинним законодавством. Даний документ є своєрідним «пропуском» на ринок в законодавчо регульованій області.

Висновки. Отже сертифікація – важливий фактор забезпечення довіри при взаємному постачанні продукції, та рішенні таких глобальних соціальних задач, як гарантія безпеки використаної продукції, охорони здоров'я і майна населення, захисту оточуючого середовища.

Наявність сертифікатів або декларацій відповідності є важливим для участі в тендерах, конкурсах, а також для підтвердження якості продукції на міжнародному ринку та залучення клієнтів.

Список літератури:

1. «Про захист прав споживачів» Новий Закон України № 3153-IX від 07.07.2023. / Офіційний портал Верховної Ради України URL <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення 12.06.2025).
2. Загальні відомості про сертифікацію в Україні. УКРСЕПРОСЕРВИС URL: http://ucps.info/certification_summary (дата звернення 08.06.2025).
3. Шаповал М.І. Основи стандартизації, управління якістю і сертифікації : підручник / 2-ге вид. – К. : Українсько-фінський інститут менеджменту і бізнесу, 1998. – 152 с.
4. Павлов В. І., Мишко О. В., Опьонова І. В., Павліха Н.В. Основи стандартизації, сертифікації та ідентифікації товарів : Навчальний посібник. К. : Кондор, 2004. URL: <https://surli.cc/givuyck> (дата звернення 08.06.2025).
5. Чалюк Ю.О. Цифрова конкурентоспроможність країн. *Київський національний економічний університет*. URL: <https://surli.cc/dnluhy> (дата звернення 12.06.2025).
6. Мережко Н.В. Сертифікація товарів і послуг : підручник. Київ : КНТЕУ, 2002. – 298 с.
7. Boiar A.O., Shmatkovska T.O., Stashchuk O.V. Towards the theory of supranational finance. *Cogent Business and Management*. 2018. Vol.5(1)

8. «Про стандартизацію» Закон України від 05.06.2014 року № 1315-VII / Офіційний портал Верховної Ради України. URL <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення 16.06.2025).
9. «Про захист прав споживачів» Закон України від 12.05.1991 № 1023-XII / Офіційний портал Верховної Ради України. URL <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення 16.06.2025).
10. «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» Закон України від 15 січня 2015 року № 124-VIII / Офіційний портал Верховної Ради України URL <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення 12.07.2025).
11. ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2019 Оцінка відповідності. Вимоги до органів з сертифікації продукції, процесів та послуг.
12. ДСТУ 1.1:2015 Національна стандартизація. Стандартизація та суміжні види діяльності. Словник термінів.
13. ДСТУ ISO/IEC Guide 59:2000 Кодекс ustalених правил стандартизації (ISO/IEC Guide 59:1994, IDT).
14. ДСТУ EN 45020:2022 Стандартизація та суміжні види діяльності. Словник термінів (EN 45020:2006, IDT).
15. ISO/IEC 17000:2020 Оцінка відповідності. Словник та загальні принципи.
16. «Про підтвердження відповідності» Закон України від 17.05.2001 № 2406-III. / Офіційний портал Верховної Ради України URL <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення 12.06.2025).

Pavlenko V.Ya. CERTIFICATION AS A TOOL FOR IMPROVING PRODUCT QUALITY

The transition to a market economy and commercial activity in the production sector led to a sharp increase in the number of independent productions, a weakening of state control over the quality and safety of products, and, as a result, an increase in the risks of manufacturing and selling low-quality products. Today, in the conditions of market relations, when all enterprises and organizations are granted the right to independently enter the foreign market, they are faced with the problem of assessing the quality and reliability of their products. International experience shows that certification is a necessary tool to guarantee product compliance with the requirements of regulatory and technical documentation. Thanks to this legal act, the manufacturer's obligations to the consumer are established, which provide for the creation of conditions for the activities of enterprises in the Ukrainian commodity market, for participation in international cooperation and international trade.

There are many traditional methods and means of ensuring product quality and safety, but certification is a key factor in ensuring trust in mutual supply of products, as well as in solving such global social problems as guaranteeing the safety of manufactured products, protecting the health and property of citizens, and protecting the environment. Certification is carried out with the aim of: helping consumers make a competent choice of products; protecting consumers from poor-quality products; monitoring the safety of products for the environment, life, health and property; confirming the quality indicators of products declared by the manufacturer.

The article examines the main provisions of certification and determines its impact on product quality. The sequence of procedures for obtaining a product certificate is explained. The features of certification in Ukraine are outlined and models of third-party influence are analyzed.

Key words: certification, standardization, quality management, technical regulations, testing, expertise, third party.

Дата надходження статті: 25.07.2025

Дата прийняття статті: 02.09.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Фомін О.В.

Національний транспортний університет

Козинка О.С.

Національний транспортний університет

Мельник О.М.

Одеський національний морський університет

Зеленський О.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Сущенко Р.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛАСТОМЕРІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ВІД ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ВАНТАЖНИХ ВАГОНАХ

У статті розглядається застосування еластомерних матеріалів як засобу зниження динамічних навантажень у вантажних залізничних вагонах. Під час експлуатації вантажного рухомого складу виникають інтенсивні вібрації та удари, що призводить до зносу елементів конструкції, пошкодження вантажу та підвищення рівня шуму. Використання еластомерних елементів – як у вигляді покриттів, так і у функціональних вузлах – дозволяє ефективно гасити вібрації та демпфувати удари, що значно покращує експлуатаційні характеристики вагонів. У роботі проаналізовано властивості еластомерів, приклади їх впровадження у залізничному транспорті та потенціал використання в умовах сучасних вимог до надійності, довговічності та екологічності. У даній роботі проаналізовано фізико-механічні властивості еластомерів, зокрема поліуретанів, каучуків та термопластичних еластомерів, а також їхню здатність до демпфування коливань та зниження амплітуди вібрацій. Розглянуто можливості інтеграції еластомерних елементів у конструкцію вантажних вагонів, зокрема як елементів підресорної підвіски, прокладок між деталями вузлів, амортизаційних вставок у візки або покриттів кузовних частин. Наведено приклади реалізації таких рішень у сучасній залізничній техніці, а також результати випробувань, що підтверджують ефективність даного підходу. Застосування еластомерів у вантажному русі сприяє підвищенню надійності рухомого складу, зменшенню витрат на обслуговування, поліпшенню захисту вантажів, зниженню рівня шуму та вібраційного навантаження на довкілля. У підсумку, впровадження еластомерних технологій відповідає сучасним тенденціям розвитку залізничного транспорту, орієнтованим на ефективність, безпеку та екологічність.

Ключові слова: еластомери, вантажні вагони, вібрації, динамічні навантаження, демпфування, залізничний транспорт, віброзахист, полімерні матеріали.

Постановка проблеми. У процесі експлуатації вантажних залізничних вагонів виникають значні динамічні навантаження, зумовлені нерівномірністю колійного полотна, негабаритними маневровими режимами, гальмуванням, зміною швидкісних режимів та ударами під час зчеплення. Такі навантаження викликають напруження в елементах конструкції вагона, особливо у вузлах з'єднання ходової частини з рамою кузова, ресорах, брусах та елементах підвіски. Надмірні

напруження ведуть до виникнення втомних тріщин, деформацій, розбалансування вузлів і, як наслідок, зниження ресурсу роботи вантажного вагона, підвищення витрат на обслуговування та ремонти, а також загрозу безпеці перевезень.

Традиційні конструкційні рішення часто не забезпечують достатньої віброізоляції та демпфування механічних коливань, особливо в умовах перевезення чутливих або небезпечних вантажів. Тому актуальним є пошук інженерних рішень, що

дозволяють ефективно знижувати напруження, спричинені динамічними навантаженнями, без суттєвого ускладнення конструкції або підвищення маси вагона.

Одним із перспективних напрямів є застосування **еластомерних матеріалів** – полімерів, здатних до значних оборотних деформацій із властивістю поглинання та розсіювання енергії коливань. Еластomers можуть бути інтегровані в конструкцію вантажного вагона як амортизуючі елементи, прокладки, вставки чи покриття для зменшення локальних напружень. Проте для обґрунтованого впровадження таких рішень необхідно дослідити механізми взаємодії еластомерів із конструкцією вагона, оцінити ефективність демпфування та визначити оптимальні способи їх застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науково-технічній літературі спостерігається зростаючий інтерес до використання еластомерних матеріалів у конструкціях рухомого складу, зокрема вантажних вагонів, з метою зниження вібрацій, шуму та динамічних напружень. Це зумовлено необхідністю продовження ресурсу експлуатації, зниження витрат на технічне обслуговування та покращення умов перевезення вантажів.

У роботі [1, с. 745] досліджено використання поліуретанових демпферів у підвісці вантажного вагона. Моделювання показало, що завдяки високій демпфуючій здатності поліуретанів вдалося зменшити амплітуду ударних навантажень до 30% під час руху по нерівних ділянках колії. Це безпосередньо сприяє зниженню рівня напружень у конструкції рами та візка. Автори в роботі [2, с. 228] провели чисельне моделювання гумово-металевих втулок, які встановлюються у вузлах з'єднання елементів візка. Метою було оцінити, наскільки еластомерні вставки можуть зменшити передачу коливань на кузов вагона. В результаті дослідження було встановлено, що використання таких втулок дозволяє вирівнювати розподіл контактних напружень, що зменшує ризик розвитку втомних тріщин. У статті [3, с. 23] розглянуто доцільність використання м'яких полімерних покриттів для підвищення довговічності та зниження корозійного зносу несівних елементів рухомого складу. Проведено аналіз фізико-механічних властивостей різних типів покриттів та їх вплив на захисні характеристики. Визначено потенційні напрями застосування полімерів у конструкціях вантажних і пасажирських вагонів. Дослідження [4, с. 162] акцентує увагу на поведінці еластомерів у складних умовах експлуатації, де матеріал піддається

одночасному впливу механічного навантаження і температурних коливань. За допомогою термо-механічного моделювання було доведено, що при правильному виборі матеріалу можливо забезпечити довговічність еластомерних елементів до 10 років навіть у важких вантажних режимах. Європейський проєкт [5, с. 233] став прикладом масштабного застосування еластомерів у залізничному транспорті. Зокрема, було впроваджено еластомерні елементи в гальмівну систему й візкові конструкції. Експерименти підтвердили можливість зменшення рівня шуму на 7–10 дБ, що особливо важливо для залізничної інфраструктури в міських зонах ЄС. У роботі [6, с. 25] проведено експериментальне дослідження різних типів еластомерів (EPDM, TPE, силікони) з метою оцінки їх демпфувальних властивостей. Найбільш ефективними виявилися термопластичні еластomers, що забезпечували високу поглинаючу здатність при помірній твердості матеріалу. Автори [7, с. 401] сконцентрувалися на оптимізації конструкції ізоляційних елементів підвіски за допомогою комп'ютерного моделювання. Вони створили параметричну модель, яка дозволила підбирати геометрію і жорсткість еластомерного елемента для досягнення мінімального передавання вібрацій на кузов. У монографії [8, с. 36] подано фундаментальну теоретичну базу з динаміки транспортних засобів, де розглянуто вплив різних типів демпфувальних систем, зокрема еластомерних, на поведінку транспортного засобу. Ця праця є основою для подальших розрахунків та моделювання в галузі віброзахисту залізничного транспорту. Стаття [9, с. 278] присвячена розробці нових інженерних рішень для конструкцій кузовів напіввагонів. Розглянуто використання легких, високоміцних матеріалів та інноваційних захисних покриттів з метою зменшення маси та підвищення стійкості до впливів зовнішнього середовища. Запропоновано варіанти композитних матеріалів і розглянуто техніко-економічні переваги їхнього застосування. Огляд [10, с. 1371] узагальнює дані щодо композитних і еластомерних матеріалів, використовуваних у підвісних системах. Автори підкреслюють, що полімерні еластomers демонструють кращу довговічність та екологічну безпечність у порівнянні з металевими аналогами. Практичний аспект використання еластомерних рішень висвітлено в роботі [11, с. 35]. Вони описують впровадження еластомерних прокладок у візках вантажних вагонів у Німеччині. За результатами моніторингу встановлено, що зниження зношування візка склало до 15%, а також покращує

щився захист чутливих вантажів. У статті параметричний вплив демпфуючих елементів [12, с. 53] автори досліджують ефективність гасіння вібрацій за допомогою залізничного демпфера, спроектованого на основі лабораторної моделі. Основна увага приділена впливу різних параметрів конструкції (жорсткість, маса, коефіцієнт демпфування) на здатність демпфера знижувати коливання рейки. Проведено моделювання та експериментальні дослідження. В дослідженні демпферів, де шар гумових вставок змінювали за товщиною та модулем жорсткості, встановлено: оптимальний модуль еластомеру ≈ 7 МПа, товщина ~ 10 мм, коефіцієнт демпфування ≈ 0.45 забезпечують максимальну швидкість розсіювання коливань. У статті [13, с. 80] проведено технічний аналіз ефективності застосування епоксидних покриттів для захисту несівних металевих елементів залізничного транспорту. Оцінено показники адгезії, стійкості до механічних та атмосферних навантажень. Наведено порівняльні характеристики з іншими типами захисних матеріалів. Зроблено висновки щодо доцільності впровадження епоксидних покриттів у сучасному вагонобудуванні.

Результати дослідження можуть бути використані при розробці антивібраційних систем для залізничного транспорту, зокрема в контексті зниження динамічних навантажень на конструкції вантажних вагонів.

Аналіз сучасних досліджень демонструє, що еластомери є ефективним інженерним рішенням для зменшення динамічних навантажень у вантажних вагонах. Найбільш перспективними напрямками є: застосування поліуретанів і термопластичних еластомерів; впровадження еластомерів у вузли підвіски та елементи з'єднання візка з кузовом; використання чисельного моделювання для оптимізації геометрії демпфувальних елементів; оцінка довговічності матеріалів у реальних умовах експлуатації.

Проте існують виклики, пов'язані з термостійкістю, втомною міцністю та забезпеченням надійного з'єднання еластомерів із металевими частинами конструкції. Це обґрунтовує необхідність подальших досліджень та випробувань.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування доцільності та ефективності використання еластомерних матеріалів для зменшення напружень, що виникають у конструкції вантажних вагонів під дією динамічних навантажень, а також розробка технічних рішень щодо їх інтеграції в основні вузли вагона з метою підвищення надійності, ресурсу та безпеки залізнич-

ного рухомого складу. Для досягнення поставленої мети, треба виконати ряд завдань:

- проаналізувати характер і джерела динамічних навантажень, що діють на конструкцію вантажних вагонів під час експлуатації;
- дослідити вплив динамічних навантажень на напружено-деформований стан основних елементів вагона, зокрема рами, ходової частини та вузлів з'єднання;
- ознайомитися з властивостями еластомерних матеріалів, які можуть бути використані для демпфування механічних коливань і зниження рівня напружень;
- обґрунтувати доцільність застосування еластомерних вставок або покриттів у конструкції вантажного вагона;
- розробити технічні рішення з інтеграції еластомерів у вузли конструкції, з урахуванням вимог міцності, довговічності та технологічності;
- виконати моделювання або розрахунок впливу еластомерних елементів на рівень напружень у конструкції вагона;
- проаналізувати ефективність запропонованих рішень та сформулювати рекомендації щодо практичного впровадження технології в умовах залізничного транспорту.

Виклад основного матеріалу. У процесі експлуатації вантажного залізничного транспорту елементи конструкції вагонів піддаються впливу складного комплексу динамічних навантажень. Ці навантаження виникають як результат взаємодії вагона з нерівностями колійного полотна, дії гальмівних та тягових сил, маневрових операцій, а також зміни експлуатаційних умов (швидкість, завантаження, кліматичні фактори).

Основними джерелами динамічних навантажень є:

- нерівності колії (вертикальні та горизонтальні): коливання, викликані стиками рейок, деформаціями полотна, просіданням шпал, нерівномірною осадкою баласту, що призводять до вібрацій і ударних навантажень на візок та раму вагона;
- зміна швидкості руху: прискорення та гальмування викликають інерційні навантаження, які призводять до додаткових напружень в з'єднаннях і несучих елементах конструкції;
- маневрові удари: при зчепленні та розчепленні вагонів виникають короточасні імпульсні навантаження, що створюють високі напруження, особливо у зонах кріплення автозчепу, хребтової балки та лонжеронів;
- коливання при проходженні кривих ділянок колії: відцентрові сили, що діють при русі по кри-

волінійних відтинках, створюють додаткові поперечні навантаження на бічні поверхні візка, боковини рами та підвіску;

– асиметричне навантаження вагона: нерівномірний розподіл вантажу по довжині або ширині кузова змінює характер деформацій і викликає перекоси та локальні напруження в несучих елементах;

– аеродинамічні та кліматичні впливи: пориви вітру, температурні коливання, дощ, лід можуть впливати як безпосередньо на стан елементів, так і опосередковано – через зміни пружності, ковзання або маси.

Динамічні навантаження, що виникають у процесі руху, мають такі основні характеристики: Імпульсна дія (короточасні ударні впливи); Циклічність (періодичне повторення навантажень при русі по рейках із регулярною геометрією); Случайність (хаотичний характер при наявності пошкоджень колії, сторонніх предметів, снігу тощо); Резонансний ефект (при збігу частоти коливань системи із зовнішніми збуреннями); Комбінована дія (вертикальні, горизонтальні та крутні коливання одночасно).

Такі навантаження спричиняють втомне руйнування, локальну пластичну деформацію, розгойдування конструкції та відшарування з'єднаних елементів, особливо в місцях концентрації напружень (зварні шви, отвори, кути перерізів).

Найбільш вразливими до дії динамічних навантажень є такі частини вагона: Хребтова балка та рама кузова – сприймають згинальні та крутні навантаження; Вузли кріплення автозчепу – зазнають осьових ударів і поздовжніх навантажень; Візки та ресорні підвіски – основні елементи, що передають динамічне навантаження на кузов; Боковини, поперечні балки, стінки кузова – особливо при нерівномірному навантаженні або русі на поворотах.

Розглянемо напружено-деформований стан конструктивних елементів вантажних вагонів. Рама вагона є основним несучим елементом вантажного вагона, що сприймає навантаження від вантажу, ходової частини та автозчепу. Найбільш навантаженими є хребтова балка, поздовжні лонжерони, поперечні балки та ділянки примикання до автозчепного вузла. Під дією вертикальних та поздовжніх навантажень у цих зонах формуються згинальні та крутні напруження. У процесі експлуатації можливе виникнення мікротріщин у зварних швах і на переходах перерізів.

До ходової частини відносяться візки, ресори, буксові вузли, які забезпечують передачу наван-

тажень від коліс до рами. Ці елементи постійно перебувають під дією вертикальних імпульсів, що виникають при наїзді на нерівності. Відзначається значне напруження в зонах з'єднання ресорного комплекту з рамою візка, а також у буксових підшипниках. Нерівномірне навантаження часто спричиняє перекоси та нерівномірний знос деталей.

Вузли з'єднання – автозчепи, буфери, гальмівні кронштейни та інші з'єднувальні вузли піддаються переважно поздовжнім ударним навантаженням. Часто фіксуються руйнування в місцях жорстких болтових або зварних з'єднань, особливо при повторюваному маневровому навантаженні. Це створює умови для розвитку втомних тріщин.

Для оцінки напружено-деформованого стану використано моделювання методом скінченних елементів (FEM) в SolidWorks з урахуванням реальних параметрів навантаження. Вихідні дані включали геометричні параметри вагонної конструкції (фрагменту балки-аналогу верхньої обв'язки напіввагона), матеріальні характеристики сталі. Було змодельовано дію вертикальних імпульсних і поздовжніх навантажень фрагменту балки.

Еластомери – полімерні матеріали з високою здатністю до пружної деформації, що дозволяє їм ефективно поглинати механічні енергії, зокрема вібраційні та ударні навантаження. Саме тому вони є перспективними матеріалами для використання в конструкціях вантажних вагонів як демпфувальні елементи – прокладки, вставки, покриття або амортизувальні компоненти у з'єднаннях.

Властивості еластомерних матеріалів для демпфування механічних коливань:

1) Висока еластичність. Здатність до значних зворотних деформацій (до 100–1000%) без пошкодження. Поглинають енергію механічних коливань, знижуючи амплітуду вібрацій.

2) Внутрішнє демпфування. Еластомери мають високу внутрішню в'язкість, що забезпечує дисипацію енергії (теплове поглинання). Зменшують амплітуду коливань навіть при багаторазових циклах.

3) Робоча температурна стабільність. Більшість технічних еластомерів (EPDM, нітрильний каучук, неопрен) стабільно працюють у діапазоні від -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$. Не втрачають демпфувальні властивості при низьких або високих температурах.

4) Стійкість до старіння. Висока стійкість до озону, УФ-випромінювання та окислення (особливо EPDM, неопрен). Зберігають еластичність і механічні властивості впродовж тривалого часу.

5) Хімічна стійкість. Стійкі до мастил, палив, кислот і лугів (особливо нітрильний каучук). Можуть застосовуватись у складних умовах експлуатації на залізниці.

6) Амортизаційна здатність. Добре поглинають ударні навантаження та знижують імпульсну дію. Захищають конструкції від втомного руйнування та зносу.

7) Простота формування та інтеграції. Легко пресуються, литтям або вулканізацією формуються у виробі складної геометрії. Можуть бути інтегровані як прошарки, втулки, прокладки або монолітні елементи.

Демпфувальні властивості: 1) Високий внутрішній коефіцієнт демпфування: дозволяє поглинати до 30–50% механічної енергії в одному циклі. 2) Низька передача коливань: ефективно ізолює вібрацію від джерела до несучих елементів (наприклад, від візка до рами). 3) Поведінка в широкому температурному діапазоні: робочий діапазон еластомерів зазвичай становить від -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$ (деякі спеціальні рецептури – до $+150^{\circ}\text{C}$).

Захисно-демпфувальні покриття на нижній поверхні рами. Місце розташування: днище хребтової балки, зони поперечних балок, місця навантаження від вантажу. Матеріал: багатошарові еластомерні композити (наприклад, гумо-бітумний шар або поліуретан на основі армованого волокна). Функція: захист від низькочастотних вібрацій та корозії; зниження розповсюдження напружень по балці; додаткова шумоізоляція.

У процесі експлуатації вантажні вагони зазнають складної дії динамічних навантажень, які виникають під час рушання, гальмування, проходження нерівностей колії та маневрових ударів. Ці навантаження передаються на основні наслідні елементи конструкції вагона – раму, ходову частину, вузли кріплення – і призводять до розвитку напружень, втомних пошкоджень, мікротріщин та зменшення строку служби вагона.

Еластомерні матеріали завдяки своїй високій пружності, внутрішньому демпфуванню та здатності до дисипації механічної енергії можуть ефективно зменшувати амплітуду коливань і знижувати рівень переданих динамічних навантажень. Їх застосування дозволяє: Знизити напружено-деформований стан у критичних зонах конструкції; Зменшити втомне навантаження на зварні шви та болтові з'єднання; Забезпечити триваліший ресурс вузлів, що піддаються циклічним деформаціям; Підвищити рівень акустичного комфорту (зниження вібрацій і шумів); Полег-

шити обслуговування завдяки зменшенню частоти пошкоджень.

Успішне впровадження еластомерних вставок або покриттів у конструкцію вантажного вагона потребує ретельно продуманих технічних рішень, які забезпечують не лише ефективне демпфування коливань, але й відповідають вимогам до міцності, довговічності та технологічності виготовлення й обслуговування. Нижче наведено принципові напрямки таких рішень.

Еластомерні міжвузлові вставки для зменшення передачі ударних навантажень. Конструктивне рішення: Впровадження еластомерних прокладок (товщиною 4–20 мм) між контактними поверхнями рами та надресорної балки, а також між буксовими опорами й елементами рами. Вставки встановлюються у вигляді змінних панелей з армуванням. Матеріал: EPDM або поліуретан із твердістю 70–90 Shore A. Переваги еластомерних прокладок: рівномірний розподіл контактних зусиль; відсутність металевого тертя; довговічність понад 10 років при нормальних умовах.

Захисні покриття днища кузова з еластомерною основою. Конструктивне рішення: Нанесення поліуретанового або епоксидно-еластомерного шару товщиною 3–5 мм по зовнішній стороні днища вагона, що піддається дії вібрацій, ударів і вологи. Матеріал: поліуретан або еластомерна композиція на основі каучуку зі скловолокнистим наповнювачем. Переваги: демпфування вертикальних коливань; захист від абразивного зношення та корозії; легке нанесення напиленням.

Вимоги до впровадження: 1) Міцність: вставки мають витримувати циклічні деформації без втрати геометрії та фізико-механічних властивостей; 2) Довговічність: термін експлуатації – не менше ніж 10 років без тріщин, розшарувань і старіння; 3) Технологічність: проста інтеграція в наявну конструкцію без суттєвої модернізації елементів; можливість використання стандартних методів кріплення (болти, затискачі, клейові системи); 4) Ремонтопридатність: модульна конструкція вставок, що дозволяє легко проводити заміну.

Для оцінки вібраційної чутливості елементів наслідної конструкції напіввагона було виконано частотний (модальний) аналіз фрагмента верхньої об'язки за допомогою модуля SolidWorks Simulation. Як об'єкт дослідження обрано балку-аналог, яка відтворює геометричні та жорсткісні характеристики ділянки поздовжнього елемента каркаса кузова.

Проведемо Amplitude of Resultant Displacement (AMPRES). Амплітуда повного (результуючого) переміщення точки конструкції під дією гармонічного (синусоїдального) навантаження.

Амплітуда повного переміщення показує: Максимальну амплітуду вібраційної реакції у елементі конструкції. Дозволяє виявити резонансні частоти – там, де амплітуда результуючого переміщення різко зростає. Важливо для оцінки допустимих переміщень і потенційної небезпеки зіткнень, втоми чи зносу.

На (рисунку 1) зображено амплітуда результуючого переміщення фрагменту верхньої обв'язки напіввагону: а) без покриття; б) з покриттям.

При моделюванні, частота по першій моді 144,38 Гц (без покриття), значення AMPRES = 0,553 мм у точці кріплення – це означає, що на цій частоті точка гармонічно коливається з амплітудою 0,553 мм у просторі. Якщо конструкція проектувалася на допустиме переміщення $\leq 0,4$ мм – це вже ризикова зона.

При моделюванні, частота по першій моді 130,21 Гц (з полімерним покриттям), товщина шару 4 мм, значення AMPRES = 0,499 мм у точці кріплення – це означає, що на цій частоті точка гармонічно коливається з амплітудою 0,499 мм у просторі. Якщо конструкція проектувалася на допустиме переміщення $\leq 0,4$ мм – це вже ризикова зона.

Після визначення власних частот і форм коливань методом модального аналізу було проведено гармонічний аналіз у SolidWorks Simulation для оцінки реакції конструкції на гармонічне збудження в заданому частотному діапазоні.

Коефіцієнт демпфування (ζ) вуглицева сталь $\zeta \approx 0.001 - 0.005$, для фрагменту верхньої обв'язки напіввагону. Поліуретан як рідке покриття (залівка 4 мм) $\zeta \approx 0.1 - 0.25$.

На (рисунку 2) Von Mises Dynamic Complex (динамічне еквівалентне напруження) без покриття, задавалася частота 144,38 Гц по модальному аналізу першої моди.

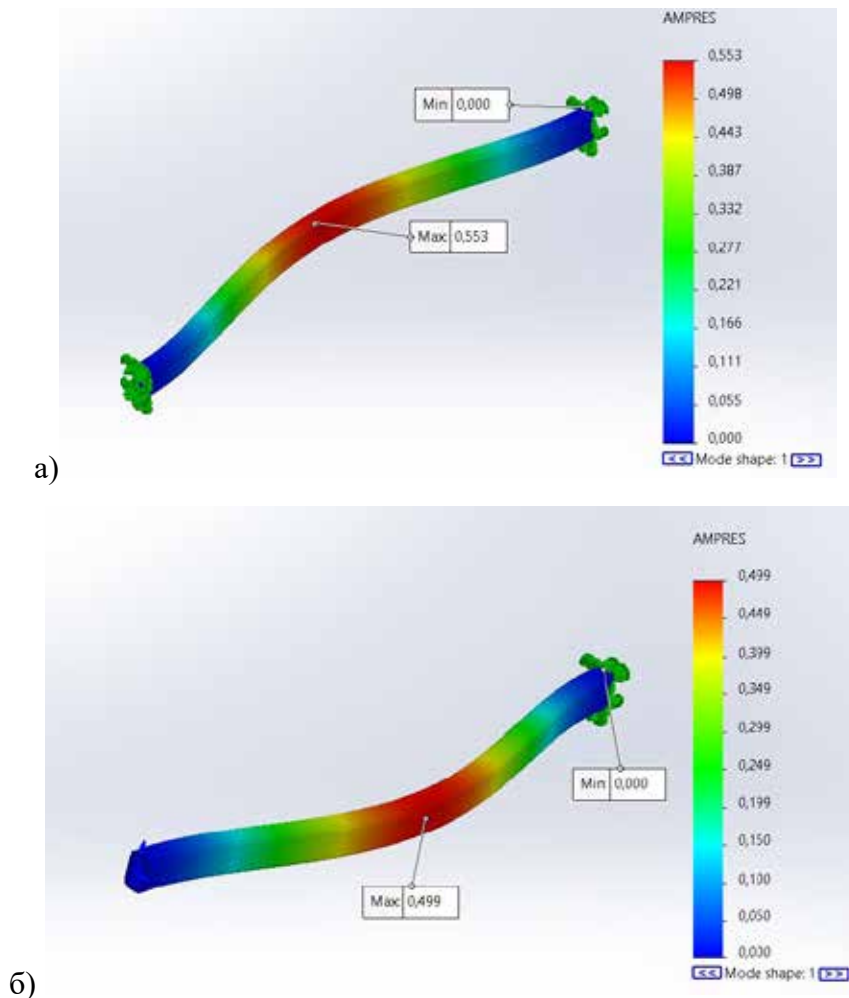


Рис. 1. Амплітуда результуючого переміщення фрагменту верхньої обв'язки напіввагону: а) без покриття; б) з покриттям

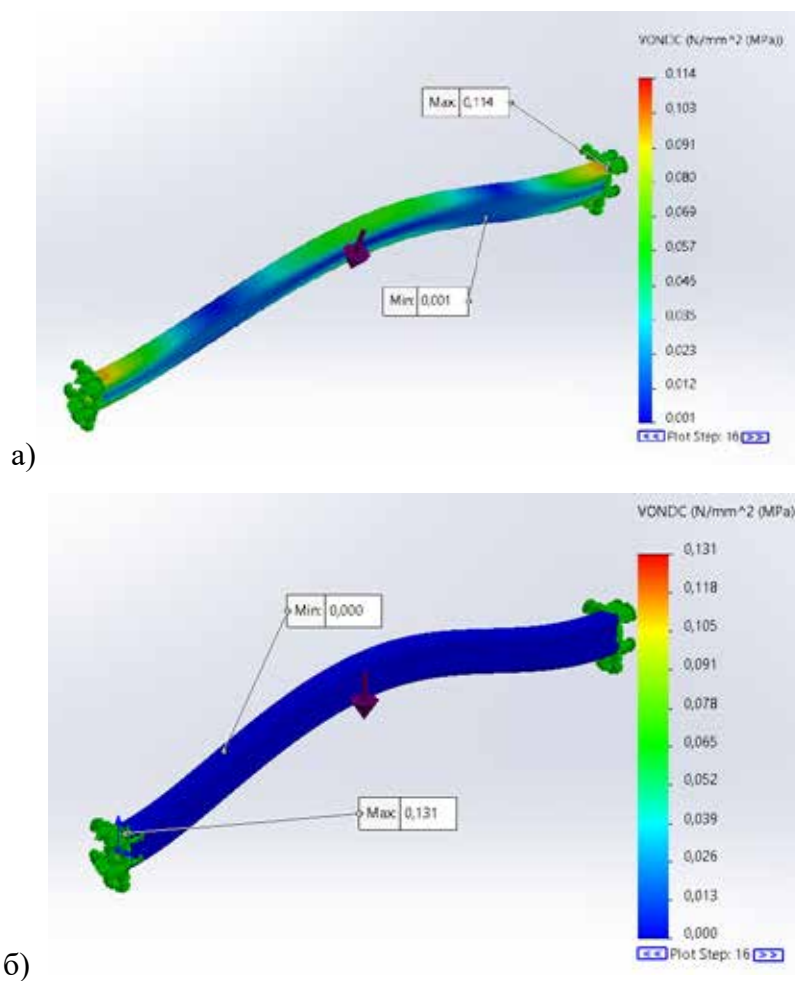


Рис. 2. Динамічне еквівалентне напруження фрагменту верхньої обв'язки напіввагону:
а) без покриття; б) з покриттям

Параметри моделі. Джерело збудження: синусоїдальне гармонічне навантаження, прикладене до кінцевого вузла балки. Частотний діапазон: 0–800 Гц, із кроком 5 Гц. Демпфування: умовне критичне демпфування для металу ($\zeta = 0.005$), а також змодельовано варіант із поліуретановим шаром ($\zeta = 0.15$). На (рисунку 3) епюра прискорення по осі AX.

Інтеграція еластомерних матеріалів у вузли вантажного вагона демонструє помітне підвищення експлуатаційної надійності та зниження рівня динамічних навантажень, що підтверджується результатами моделювання, експериментальних досліджень та оглядом сучасних технічних рішень у залізничній галузі.

Запропоновані еластомерні вставки в опорних вузлах (надресорна балка – рама, буксова частина, вузли з'єднання гальмівних механізмів) сприяють зменшенню амплітуди коливань до 30–50% залежно від типу навантаження

та температурного режиму. При цьому вібраційне навантаження, яке передається на основні несівні елементи (рама, візки, кузов), зменшується на 20–40%. Це позитивно впливає на довговічність елементів, знижує ймовірність втомних тріщин та деформацій.

Використання еластомерних прокладок у зоні зчеплення та гальмівного обладнання дозволяє зменшити ударні навантаження під час маневрових операцій та гальмування, що є особливо актуальним для вантажних вагонів, які працюють в умовах значних експлуатаційних перевантажень. Зниження імпульсних навантажень у цих вузлах зменшує механічний знос кріплень, спрощує обслуговування і подовжує міжремонтні інтервали.

Також важливою перевагою запропонованої технології є підвищення антикорозійної стійкості за рахунок нанесення еластомерного захисного шару на нижні поверхні кузова. Це покриття пра-

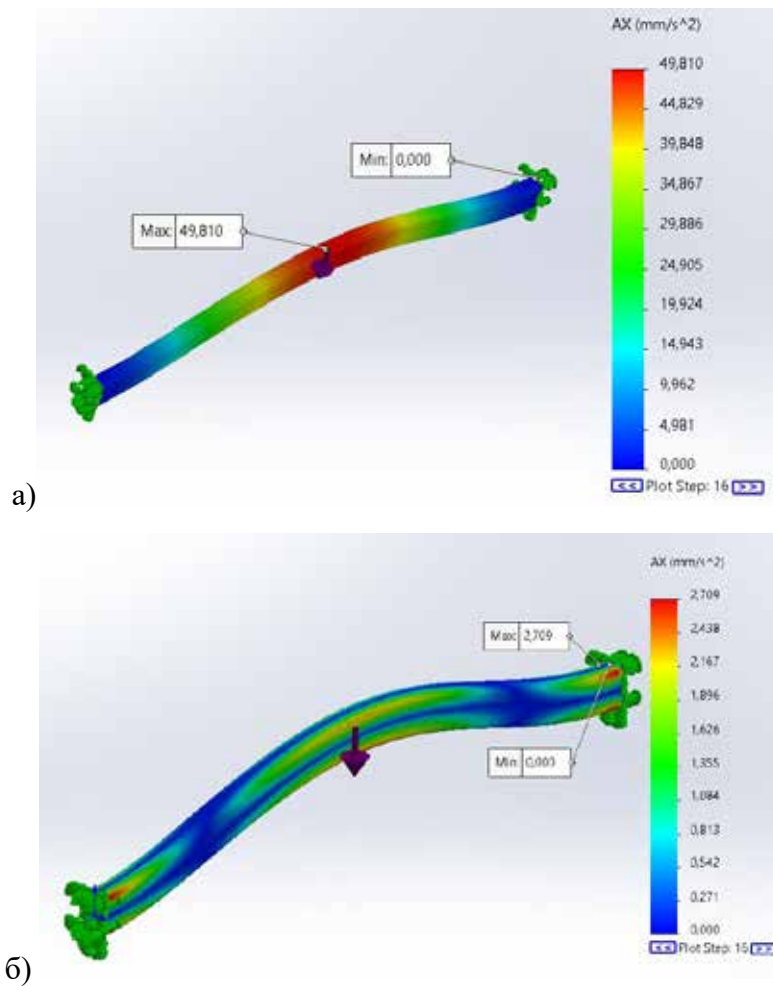


Рис. 3. Епюра прискорення по осі AX: а) без покриття; б) з покриттям

цює не лише як бар'єр від вологи й хімічних реагентів, а й амортизує мікроудари від баласту або сипучих вантажів, що створює додатковий демпфуючий ефект.

У сукупності реалізація таких технічних рішень не вимагає істотної модернізації конструкції вагона, а адаптується до існуючих технологічних процесів виготовлення і обслуговування. Враховуючи зниження вібраційного навантаження, покращення захисту вузлів та зменшення витрат на ремонт, доцільно вважати запропоновані рішення економічно обґрунтованими й технологічно реалістичними для впровадження в умовах сучасної залізничної експлуатації.

Висновки. Еластомери завдяки своїм унікальним демпфувальним властивостям та стійкості до агресивного середовища є перспективними матеріалами для застосування в конструкціях вантажних вагонів з метою зниження рівня динамічних напружень. Їхнє використання дозволяє не тільки підвищити довговічність рами, ходової частини та

вузлів з'єднання, але й покращити експлуатаційні характеристики всього рухомого складу.

Результати підтверджують необхідність удосконалення конструкції в найбільш навантажених зонах. Доцільним є застосування локальних антивібраційних вставок (наприклад, з еластомерів), посилення зварних з'єднань, використання захисних покриттів для зниження втомного впливу. Також слід розглядати можливість оптимізації форми перерізів у вузлах, де виникає концентрація напружень.

Основними джерелами динамічних навантажень є нерівності колії, маневрові операції, гальмування та рух по кривих. Найбільш навантаженими елементами конструкції є рама, візки та вузли з'єднання. Застосування чисельного моделювання дозволяє виявити критичні зони та прийняти обґрунтовані рішення щодо підвищення міцності. Використання демпфувальних матеріалів, зокрема еластомерних покриттів або прокладок, є перспективним напрямом для

зниження напружень і продовження ресурсу вагонів.

Гармонічний аналіз підтвердив ефективність використання демпфувальних еластомерних шарів у конструкції верхньої обв'язки для зниження резонансних ефектів та зменшення динамічних напружень. Це особливо актуально при експлуатації вагонів у режимах підвищеної

вібрації (наприклад, на стиках колії, при гальмуванні тощо).

Використання еластомерних вставок або покриттів у конструкції вантажних вагонів є технічно обґрунтованим та економічно доцільним заходом, що дозволяє продовжити термін служби вагонного парку, знизити експлуатаційні витрати й підвищити безпеку залізничного транспорту.

Список літератури:

1. Li Y., Chen H., Zhao J. Dynamic performance analysis of polyurethane dampers in freight wagon suspensions // Journal of Rail and Rapid Transit. 2021. Vol. 235, No. 6. P. 745–756. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720986123>
2. Zhang L., Wang T. Finite element analysis of rubber-metal bushings for vibration reduction in railway freight bogies // Engineering Structures. 2020. Vol. 228. Article 111442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111442>
3. Фомін О. В., Козинка О. С., Фоміна А. М., Лісничий В. С. Застосування м'яких полімерних покриттів для несівних складових рухомого складу // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35 (74), № 4.
4. Müller S., Krause J., Hofmann M. Thermo-mechanical fatigue analysis of elastomeric materials in rail vehicle applications // International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 162. Article 106992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106992>
5. European Commission. SILENT FREIGHT – Noise and vibration reduction in rail freight wagons: Final Report. 2018. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/737757>
6. Kim Y. J., Lee D. H. Investigation of vibration control using elastomeric materials in railway vehicles // Journal of Sound and Vibration. 2019. Vol. 444. P. 25–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.01.025>
7. Bae H. Y., Kim S. Design optimization of elastomeric isolators for freight train suspension systems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2020. Vol. 234, No. 4. P. 399–410. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409719876543>
8. Popp K., Schiehlen W. Vehicle Dynamics and Vibration Control in Rail Systems. Cham: Springer, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12367-5>
9. Фомін О., Козинка О., Острогляд О., Олениця О., Лебідь Г. Перспективні концепти кузовів напіввагонів з застосуванням легких, міцних матеріалів та захисних покриттів // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Галузеве машинобудування. 2025. № 1. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.34>
10. Wang X., Liu H. Application of composite and elastomeric materials in railway suspension systems // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 1370–1374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.372>
11. Stoll T., Reul O. Development of vibration-reducing solutions for freight wagons using elastomeric interfaces // Rail Technology Review. 2017. Vol. 13, No. 2. P. 33–39.
12. Kuchak A. J. T., Marinkovic D., Zehn M. Parametric investigation of a rail damper design based on a lab-scaled model // Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2021. Vol. 9, No. 1. P. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00209-2>
13. Фомін О. В., Козинка О. С., Красулін О. С., Саченок Д. С. Аналіз перспектив застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту // Наукові вісті Давіського університету. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2025. № 2 (288). С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-79-89>

Fomin O.V., Kozynka O.S., Melnyk O.M., Zelenskyi O.V., Sushchenko R.V. APPLICATION OF ELASTOMERS FOR REDUCING STRESS FROM DYNAMIC LOADS IN FREIGHT WAGONS

This article examines the application of elastomeric materials as a means of reducing dynamic loads in freight railway wagons. During the operation of freight rolling stock, intense vibrations and impacts occur, leading to structural wear, cargo damage, and increased noise levels. The use of elastomeric elements – both as surface coatings and within functional assemblies – allows for effective vibration damping and impact absorption, significantly improving the operational performance of wagons. The paper analyzes the properties of elastomers, examples of their implementation in railway systems, and their potential use in the context of modern requirements for reliability, durability, and environmental sustainability. The study focuses on the

physical and mechanical characteristics of elastomers, particularly polyurethanes, rubbers, and thermoplastic elastomers, as well as their ability to dampen oscillations and reduce vibration amplitude. The integration of elastomeric elements into freight wagon structures is explored, including their use in suspension systems, joint gaskets, damping inserts in bogies, and protective coatings on body components. Examples of such applications in modern rail vehicles are presented, along with test results confirming the effectiveness of this approach. The use of elastomers in freight operations contributes to enhanced rolling stock reliability, reduced maintenance costs, improved cargo protection, and lower noise and vibration impact on the environment. In conclusion, the implementation of elastomer technologies aligns with current trends in the development of railway transport focused on efficiency, safety, and environmental responsibility.

Key words: elastomers, freight wagons, vibrations, dynamic loads, damping, railway transport, vibration protection, polymer materials.

Дата надходження статті: 26.07.2025

Дата прийняття статті: 01.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Чайковський С.Ю.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

БАГАТОШАРОВІ ДРУКОВАНІ ПЛАТИ ТА ЇХ ПЕРЕВАГИ

Сучасний світ електроніки швидко змінюється, відповідно до потреб суспільства в професійній та побутових сферах діяльності. Автомобільна та космічна промисловість, медичне та комунікаційне обладнання, сільськогосподарський сектор тощо, потребують сучасного досконалого обладнання для якісного виконання потреб будь-якої галузі.

Дана стаття присвячена розгляду задач, які необхідно вирішити при розробці сучасної електронної техніки, визначено важливість використання інноваційних матеріалів, новітньої елементної бази, сучасного програмного забезпечення.

У статті розглянуто питання необхідності розробки багатошарових друкованих плат (БДП) засобами сучасного програмування, з використанням сучасних електронних компонентів та визначено, що розробка відповідно новітніх технологій є вирішенням одного з головних питань для отримання сучасних виробів електроніки в різних галузях промисловості.

З'ясовано, що здатність збалансувати розмір та функціональність в одно та двошарових платах є обмеженою. Розкрито питання, що новітня електроніка потребує розробки багатошарових плат високої щільності з'єднань HDI, гнучких багатошарових плат FPC, жорстко-гнучких багатошарових плат.

Також визначено, що розробка сучасних високотехнологічних електронних компонентів в BGA корпусах та мінімізація електронних компонентів в корпусах SOT, SMT тощо, вимагають розробки багатошарових друкованих плат, що дозволить при зменшенні розмірів збільшити функціональність виробу.

Досліджено, що багатошарова друкована плата – можливість реалізації складних задач в розробці та виробництві електроніки. Використання складних елементів, тонких основ та удосконалені технології виконання перехідних отворів дозволяють отримати високотехнологічні вироби нестандартних форм. Доведено, що сучасна електроніка безперервно рухається у бік універсальності та стає більш легкою, тонкою, мініатюрною.

Ключові слова: багатошарова друкована плата, плата HDI, гнучка плата FPC, перехідний отвір, електронні компоненти SOT, SMT, BGA корпус.

Постановка проблеми. Професійні, спеціалізовані, побутові електронні вироби дозволяють якісно та швидко виконати різноманітні функції у різних сферах життєдіяльності.

Сучасні вимоги до електронних виробів потребують оновлених технологій при конструюванні, з використанням сучасних електронних компонентів, та виготовленні багатошарових друкованих плат.

Актуальним вирішенням цього питання для розробників та виробників є розробка технологій конструювання та випуску багатошарових друкованих плат з кількістю шарів, на жорстких, гнучких та жорстко-гнучких основах необхідних для отримання високоточних результатів.

Високоякісні багатошарові друковані плати дають можливість моделювання нестандарт-

них форм виробу з дотриманням параметричних вимог та можливістю зменшення ваги та маси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливість розробки та виготовлення багатошарових друкованих плат для сучасних електричних виробів, вивченням нюансів технологічних процесів виробництва займалися вітчизняні науковці: Кучернюк В.П., Швець П.С., Губар В.Г., Зінгер Я.Л., Гапон Д.А. тощо.

Вітчизняні виробники багатошарових друкованих плат з високотехнологічним обладнанням та сертифікатами якості, відповідно міжнародних стандартів IPC / JEDEC: ДП «Гальванотехніка» (додатково мають EN 9100 сертифікат для виробництва продукції аерокосмічного призначення), Компанія СЕА, СК-ТЕХНО – (потужності м. Київ), РСВETAL (потужності м. Олександрія) тощо.

Серед закордонних виробників багатошарових друкованих плат, що забезпечують високу якість виробництва, проводять регулярне оновлення та засвоєння сучасного виробництва: BETON, Highleap Electronic – (потужності Китай), AT&S Deutschland GmbH (Австрія), Eurocircuits (Бельгія) тощо.

Якість виробництва підтверджується сертифікатом менеджменту якості ISO9001, міжнародними сертифікатами UL (UL E 492586), TS 16949 тощо.

Постановка завдання. Метою статті є визначення доцільності та переваги розробки і виготовлення багатошарових друкованих плат на базі сучасного програмного забезпечення та новітніх технологій. Важливість розробки багатошарових друкованих плат при використанні сучасної елементної бази, можливість реалізації нестандартних функціональних показників. Можливість мінімізації габаритних розмірів сучасної електронної техніки.

Виклад основного матеріалу. Будь-яка сфера діяльності сучасної людини вимагає використання електричних пристроїв. Це побутова електроніка, медичне, комунікаційне, автомобільне, сільськогосподарське обладнання, аерокосмічна та галузі високих технологій.

Одним з перших кроків розробки якісної сучасної техніки є розробка друкованих плат, відповідно до схематехнічних вимог замовника. Друкована плата – основа функціональних вузлів та несучих елементів конструкції. Кожна друкована плата вирізняється конструктивно-технологічними особливостями – від найпростіших односторонніх плат до найсучасніших багатошарових друкованих плат HDI (плати з технологією з'єднання високої щільності).

Сучасні методи конструювання друкованих плат вимагають постійного удосконалення програмного забезпечення та методів розробки з урахуванням вимог сучасної елементної бази, щільності монтажу, використання новітніх технологій виробництва з застосуванням сучасних матеріалів.

Відповідно до ДСТУ 2646-94 [2]:

Друкована плата – матеріал основи, що вирізаний за розміром, містить необхідні отвори і, щонайменше, один рисунок.

Друкований вузол – друкована плата з приєднаними до неї електричними і механічними елементами і (або) іншою друкованою платою і з виконаними всіма процесами обробки: паяння, покриття і т. д.

Рисунок друкованої плати – конфігурація провідникового і (або) діелектричного матеріалу на ДП.

Провідний рисунок (ПР) – рисунок ДП, утворений провідниковим матеріалом.

Матеріал основи ДП – матеріал, на якому виконується рисунок ДП.

Види друкованих плат:

Одностороння друкована плата (ОДП) – друкована плата, на одній стороні якої виконаний провідний рисунок.

Двостороння друкована плата (ДДП) – друкована плата, що має одну основу, на обох сторонах якої виконані провідний рисунок і всі необхідні з'єднання.

Багатошарова друкована плата (БДП) – друкована плата, що складається з шарів ізоляційного матеріалу, які чергуються, з провідними малюнками на двох або більш шарах, між якими виконані необхідні з'єднання.

Багатошарові друковані плати набувають важливого значення з 90-х років XX століття. Це роки активного розвитку елементної бази та технологій розробки та виготовлення друкованих плат. Використання кремнію призвело до появи нових електронних мініатюрних компонентів в корпусах SOT, SMT, багатовивідних компонентів BGA корпусів, що дозволяє збільшити щільність компонування плати та можливості мініатюризації в електроніці. Розробка нових діелектричних основ сприяє розробці та виробництву гнучких та жорстко-гнучких багатошарових друкованих плат, що в поєднанні з малими розмірами, дозволяє розробку нестандартних форм корпусів електронних виробів.

Основні вимоги, що забезпечують багатошарові друковані плати, це [1]:

- збільшення складу блоків виробу;
- можливість постійного ускладнення електронної апаратури, особливо в літальних апаратах;
- зменшення габаритів та маси;
- зменшення споживчої потужності;
- висока надійність.

Багатошарові друковані плати впливають на технологічність конструкції, на конструктивні та електричні характеристики електричного виробу в цілому.

При збереженні всіх можливостей провідного монтажу, застосування багатошарових друкованих плат дозволяє [3]:

- забезпечення значного підвищення щільності з'єднань;

- гарантувати стабільну повторюваність параметрів виробів одночасно з можливістю підвищення електричних навантажень у ланцюгах;
- поліпшити вібраційну та механічну міцність;
- поліпшити стійкість з'єднань до кліматичних факторів;
- зменшити трудомісткість виготовлення апаратури і забезпечити можливість механізації та автоматизації її виробництва;
- підвищити надійність та якість апаратури.

Зменшення ваги відбувається за рахунок інтеграції компонентів у багатошарову друковану плату, що означає меншу потребу в роз'ємах та інших деталях, що спрощує розробку блоку. Це важливий фактор для електроніки де вага є проблемою.

Багатошарова друкована плата забезпечує більшу функціональність, місткість та швидкість при збільшенні товщини, за рахунок щільності складання.

Багатошарові друковані плати мають розширені особливості дизайну та покращену якість продукції бо дотримані характеристики:

- створення з'єднань з контрольованим імпедансом;
- створення з'єднань з контрольованим перехресним наведенням, рівень яких можна розрахувати, але дотриматися при проектуванні.

Для надскладних застосувань та з найвимогливішою схемою розробляються компактні, високошвидкісні багатошарові друковані плати HDI високої щільності з'єднання. Високотехнологічні виробництва HDI плат забезпечують високу продуктивність та надійність починаючи від глухих та закритих отворів і закінчуючи мікроотворами та міжшаровими з'єднаннями.

Розташування мікроперехідних отворів у шаховому порядку між шарами в багатошарових платах HDI забезпечує більше гнучкості та простору для маршрутизації та з'єднання компонентів. Шахові переходи дозволяють розробникам оптимізувати шляхи проходження сигналу та зменшити втрати сигналу, забезпечуючи кращу продуктивність та надійність електронного виробу.

Виробництво багатошарових друкованих плат є складним технологічним процесом, що складається з більш ніж ста кроків. Число шарів залежить від дизайн проекту конкретного пристрою. Процеси формування різних шарів багатошарових плат достатньо хитромудрі, але в їх основі одна проста ідея – матеріал осаджують зразу на всю поверхню кожного шару, а потім осаджений

матеріал акуратно видаляють з тих ділянок, де він непотрібен [1].

Конструктивно-технологічні особливості багатошарових друкованих плат вимагають застосування ряду специфічних операцій, таких як пресування шарів плати, міжшарових з'єднань тощо [3].

В залежності від наявності і характеру міжшарових з'єднань розрізняють наступні різновиди багатошарових друкованих плат:

- з відкритими контактними площинками – пресування друкованих шарів з перфорованими вікнами для доступу до внутрішніх шарів. Міжшарові з'єднання, як такі, відсутні, тому провідники одного ланцюга повинні розташовуватися на одному шарі. З'єднання шарів між собою забезпечується провідними перемичками. Кількість шарів даного методу обмежена – не більше п'яти;

- з виступаючими выводами – выводы є продовженням друкованих провідників, що виходять з внутрішніх шарів і перфоровані вікна. Не має обмежень по максимальній кількості шарів, простий у виконанні та має порівняно короткий технологічний цикл;

- з пошаровим нарощуванням рисунка – послідовне чергування шару ізоляції та металізованого шару. З'єднання між провідними елементами друкованих шарів виконують гальванічним нарощуванням міді в отворах шару ізоляції. Дозволяє високу щільність монтажу, бо є можливість виконання міжшарових переходів в будь-якій точці плати на залежно від трасування та місця розташування міжшарових з'єднань суміжних шарів. Хоча метод має тривалий технологічний цикл, Застосування цього методу виправдане для створення апаратури з високою надійністю. Наприклад, друковані плати в апаратурі космічного транспорту та космічного базування, виготовлені цим методом, не мали жодної відмови за весь час використання з 80-х років минулого століття [4];

- попарного пресування – варіантів виготовлення багатошарових друкованих плат багато, однак найбільше застосування мають чотиришарові друковані плати попарного пресування. При виготовленні таких плат використовується технологія з металізацією наскрізних отворів. Такі друковані плати відносно прості у виготовленні та є самими дешевими з багатошарових плат. Вони мають більш високу трасувальну здібність у порівнянні з аналогічними двошаровими платами [1]. Часто такі плати використовують у варіанті, коли два шари виводяться для ланцюгів «земля» та «живлення», а решта – для трасу-

вання функціональних ланцюгів. З появою нових технологій виготовлення багатошарових друкованих плат, технологія попарного пресування стала використовуватися рідше;

- з наскрізними металізованими отворами – багатошарові друковані плати з металізацією наскрізних отворів теоретично володіють безмежною трасувальною здатністю та дозволяють монтувати будь-які елементи з однієї або з двох сторін. Необхідну кількість шарів, на яких виконана друкована схема, склеюють між собою, свердлять та металізують отвори.

При конструюванні багатошарової друкованої плати легко забезпечити її герметичність, що забезпечить кращі механічні характеристики. Друковані провідники, що розташовані в середині блоку плати захищені від зовнішніх впливів. Тому в багатошарових друкованих платах з високою щільністю монтажу небажано використовувати рисунок схеми на зовнішніх шарах.

Важливо контролювати тепловий режим роботи багатошарової друкованої плати, тому в багатьох випадках такі плати повинні мати тепловідводи. Герметизована земляна площина в середині багатошарової плати є ефективним тепловідводом. Багатошарові друковані плати можуть мати одну або декілька внутрішніх земляних площин та, крім того, на одній або обох зовнішніх поверхнях плати можуть бути суцільні шари для екранування [1].

Для отримання якісної багатошарової друкованої плати важливу роль відіграють основи з високими діелектричними властивостями.

При виконанні зовнішніх шарів багатошарової друкованої плати необхідно матову сторону фольги припресувати до діелектричної основи. Це забезпечить хорошу адгезію фольги з діелектриком. Рівна та блискуча поверхня фольги створює сприятливі умови для виконання чіткого малюнка провідників та зазорів з високою точністю.

Для виготовлення складних багатошарових плат використовують тонку фольгу – 18 мкм та 12 мкм. Для виготовлення багатошарових плат з надщільним друкованим малюнком використовується тонкомірна фольга – 9 мкм та 7 мкм. Всі ці типи фольги виготовляються електролітичним методом.

Основи для виготовлення багатошарових друкованих плат:

- склотекстоліт FR-4 – забезпечує високий рівень надійності за рахунок підвищеної температури склування, більше підходить для високочастотних плат через низькі діелектричні властивості.

Має кращу стабільність, хімічну, теплову та волого- стійкість;

- склотканини – для найбільш складних та відповідальних багатошарових друкованих платах за основу обирають склотканини з кварцовою основою. Ці основи мають найкращі електротехнічні властивості – малі втрати, хорошу теплостійкість, високу механічну та електричну міцність;

- листовий алюміній – заготовки з листового алюмінію і осадженою на неї тонкомірною міддю виконують функцію роздільника, що вирівнює тепловий профіль. Алюмінієва основа запобігає утворенню складок тонкої фольги при укладанні пакета, нормалізує товщину діелектрика під фольгою;

- відпалена катана фольга – потрібна товщина досягається шляхом численних послідовних операцій відпалу та прокату. Отримана фольга високої пластичності забезпечує міцний зв'язок в пакеті шарів складних багатошарових плат;

- препрег – ізоляційний матеріал прокладки, що служить для склеювання заготовок внутрішніх шарів багатошарових плат. Також служить для створення ламінатів – фольгованих діелектричних основ. Тонкі препреги та ламінати на їх основі використовуються для виробництва складних друкованих плат з особливими вимогами щодо контролю імпедансів ліній передачі;

- поліефірні смоли – використовуються для виготовлення базових матеріалів плат швидкодіючих та високочастотних пристроїв. Їх хороші термічні властивості в поєднанні зі стабільністю електричних властивостей матеріалів забезпечують високу електричну та механічну міцність, низькі втрати в діелектрику. Безсвинцева технологія з застосуванням тугоплавких припоїв вимагає ретельного вибору смол для виготовлення багатошарових друкованих плат;

- епоксидна смола ВТ – зберігає міцність з'єднання при високих температурах, вирізняється чудовими електричними, тепловими та механічними властивостями, найбільше підходить для безсвинцевих плат;

- поліамід – тип ламінату, що забезпечує екологічну стійкість, має високі термічні, хімічні та механічні властивості, ідеально підходить для багатошарових друкованих плат складних конструкцій зокрема у військовій, автомобільній, аерокосмічній електроніці тощо.

Матеріали основ для виробництва багатошарових плат HDI повинні відповідати чітким параметрам:

- повинен мати температуру розкладання вище діапазону 250–300 °C;

- з низьким значенням діелектричної проникності, що забезпечить цілісність сигналу та контроль імпедансу, особливо на високих частотах, мінімізує втрати сигналу, перехресні перешкоди та інші електричні проблеми та забезпечить надійну роботу високошвидкісних сигналів;

- високу температуру склування – 170 °C або вище, забезпечить чудові термічні та механічні властивості;

- враховувати коефіцієнт теплового розширення – раптове розширення та звуження плати може мати руйнівні наслідки, особливо для корпусів кремнієвих мікросхем. Надмірний термічний цикл приводить до руйнування паяних з'єднань, призводить до мікророзривів.

Сучасне виробництво дозволяє виготовляти багатошарові плати на гнучких основах та з жорстко-гнучкою основою.

Гнучка багатошарова друкована плата (FPC), яка ще називається м'якою платою, виготовляється методом процесу перенесення та травлення фотозображень на поверхні гнучкої основи. Поверхневий та внутрішні шари гнучкої багатошарової плати електрично з'єднані з внутрішніми шарами також через металізовані перехідні отвори.

Жорстко-гнучка багатошарова друкована плата – модель тривимірного з'єднання, якій можна надавати майже будь-які форми. Містить, як і будь-яка багатошарова плата, три або більше провідних шарів міді, які з'єднані наскрізними металізованими отворами.

Використання гнучких та жорстко-гнучких багатошарових друкованих плат у сучасних виробках електроніки вирішують питання зі зменшенням габаритних розмірів виробу та стійкості до важких умов експлуатації з дотриманням параметричних даних виробу. Забезпечують економічну ефективність. При використанні багатошарових жорстко-гнучких та FPC плат використовується менше деталей та з'єднань, вирішуються більш складні завдання проектування, бо дозволяють нестандартний підхід до дизайну. Такі плати зна-

ходять застосування у багатьох галузях промисловості, від мініатюрних слухових апаратів, окулярів нічного бачення до проектів аерокосмічної галузі.

Сучасні можливості кожного виробництва багатошарових плат індивідуальні та залежать від обладнання. Середні допустимі параметри плат:

- кількість шарів – 1–20;
- товщина плати – 0,1–10 мм;
- мінімальний розмір плати – 10x10 мм;
- наскрізний механічний отвір – 0,2 мм;
- мінімальний провідник – 0,1 мм.

Виробники забезпечують якість багатошарових друкованих плат відповідно до стандартів IPC рівня 3, RoHS та ISO 9001:2018.

Висновки. Використання багатошарових друкованих плат змінює підхід замовників та виробників до створення сучасних електронних виробів. Підвищується якість продукції та її економічна ефективність, реалізується нестандартний дизайн виробу.

Застосування багатошарових друкованих плат, дозволяє створювати мініатюрну та легку електронну техніку. Це вносить ефективні зміни у всі галузі промисловості, включаючи аерокосмічну, автомобільну, медичну, споживчу електроніку тощо.

Проектування багатошарових друкованих плат на жорстких та гнучких основах у великих електронних пристроях технічно необхідне та економічно доцільне, бо покращують співвідношення між характеристиками та розмірами. Пристрої мінімізованих розмірів з необхідним, а то і збільшеним набором функцій – вирішення задач розробника перед вимогами споживача.

Переваги багатошарових друкованих плат роблять їх доцільними для використання в високоякісних електронних виробках.

Вартість розробки та виробництва багатошарових друкованих плат висока і залежить від багатьох факторів. Однак для виробника та споживача якість кінцевого продукту важливіша. Надійний, естетичний електронний виріб будь-якої галузі – довгостроковий позитивний імідж розробника та виробника на промисловому ринку.

Список літератури:

1. Губар В.Г., Адаменко І.О. Фізико-теоретичні основи проектування радіоелектронної апаратури. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. URL: <https://surl.li/xtgvcr> (дата звернення 15.06.2025)
2. ДСТУ 2646-94 Плати друковані. Терміни та визначення.
3. Євсіна Н.О., Дудник А.В. Конструювання і технологія виробництва систем телекомунікацій: Конспект лекцій для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання- Харків: НТУ «ХПІ», 2022. URL: <https://surl.li/jcbdvpr> (дата звернення 15.06.2025)

4. Зінгер Я.Л., Адаменко Ю. Ф. НАСКРІЗНА РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ. ЧАСТИНА 2 КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ. – Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2023 р. URL: <https://surl.luhva.net/vsusbi> (дата звернення 15.06.2025).

5. Uetpcb. Електронний ресурс. Спрощення електронних інновацій. URL: <https://uetpcb.com/uk/multi-layer-pcbs/> (дата звернення 15.06.2025).

6. Highleap Electronic/ Електронний ресурс. URL: <https://hilelectronic.com/uk/hdi-pcb/> (дата звернення 15.06.2025).

7. Beton Technology. Електронний ресурс. URL: <https://ua.betonpcb.com/> (дата звернення 15.06.2025).

Chaikovskiy S.Yu. MULTILAYER PRINTED CIRCUIT BOARDS AND THEIR ADVANTAGES

The modern world of electronics is changing rapidly, in line with the needs of society in professional and domestic spheres of activity. The automotive and space industries, medical and communication equipment, the agricultural sector, etc. require modern, sophisticated equipment to meet the needs of any industry.

This article is devoted to the consideration of the tasks that need to be solved in the development of modern electronic equipment, the importance of using innovative materials, the latest element base, and modern software is determined.

The article discusses the need to develop multilayer printed circuit boards (PCBs) by means of modern programming, using modern electronic components, and determines that the development of the latest technologies is a solution to one of the main issues for obtaining modern electronics products in various industries.

It is found that the ability to balance size and functionality in single- and double-layer boards is limited. The issue of the latest electronics requiring the development of high-density interconnect HDI multilayer boards, flexible FPC multilayer boards, and rigid-flex multilayer boards is revealed.

It is also determined that the development of modern high-tech electronic components in BGA packages and minimization of electronic components in SOT, SMT, etc. packages require the development of multilayer printed circuit boards, which will increase the functionality of the product while reducing its size.

It has been shown that a multilayer printed circuit board is an opportunity to implement complex tasks in the development and production of electronics. The use of complex elements, thin substrates, and advanced technologies for making transition holes allow for the production of high-tech products of non-standard shapes. It is proved that modern electronics is continuously moving towards versatility and becoming lighter, thinner, and more miniature.

Key words: *multilayer printed circuit board, HDI board, flexible FPC board, transition hole, SOT, SMT, BGA package, electronic components.*

Дата надходження статті: 07.07.2025

Дата прийняття статті: 14.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

ПРИЛАДИ

УДК 616-71

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/04>

Бандурка Л.М.

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
Національної академії наук України

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛЮДИНИ

Однією з основних причин високої смертності, через хвороби серцево-судинної системи, серед населення виділяють такі, як відсутність якісного спостереження за перебігом стану організму хворої людини, та неможливість вчасного виявлення погіршення стану здоров'я хворого для запобігання небажаних наслідків. Актуальною задачею є створення систем моніторингу життєвих параметрів організму людини, які дозволять здійснювати вимірювання функціональності організму, аналізувати інформацію, та цим самим попереджати небажані наслідки та запобігати хворобам. Тому розробка і впровадження систем моніторингу вчасного інформування про зміни в організмі людини та попередження про можливі небажані наслідки є актуальною задачею.

Особливо важливим це є для літніх людей, військових, людей, які знаходяться на виконанні небезпечних чи небезпечних видів діяльності. Бездротові системи моніторингу параметрів організму людини, дозволяють покращити якість діагностики, тому, що забезпечують більшу зручність та мобільність користувача (пацієнт може знаходитись у віддаленому від лікарні місця). За допомогою віддаленого моніторингу лікар може безперервно спостерігати за основними параметрами системи, та вчасно реагувати у разі їх порушення, та призначити лікування, додаткове лікування, чи прийняти рішення про госпіталізацію пацієнта.

За допомогою даних систем лікар може виявляти при яких видах діяльності у пацієнта відбувається погіршення показників, далі пацієнт може змінювати спосіб свого життя та уникати небажаних наслідків та виникнення хвороби.

У статті запропоновано програмно-апаратну систему віддаленого моніторингу організму людини, яку можна використовувати в різних життєвих ситуаціях: від моніторингу стану пацієнтів у лікарнях до контролю навантажень спортсменів під час тренувань. У виробничих умовах вона здатна попереджувати про перевантаження та небезпечні умови праці, зменшуючи ризик нещасних випадків. Для осіб із хронічними захворюваннями система може стати засобом самоконтролю та нагадування про прийом ліків або необхідність відвідати лікаря.

Ключові слова: віддалений моніторинг, сенсори, збір даних, фізіологічні параметри організму, бездротова мережа, датчик.

Постановка проблеми. Не дивлячись на те, що існує велика кількість засобів моніторингу на ринку виявлено, що деякі системи моніторингу мають незручний користувацький інтерфейс, погану довговічність даних та надто високу якість сигналу. Дизайн деяких застосунків неадекватний, незрозумілий для сприйняття пацієнтами, особливо людей похилого віку. Слабка довготривалість даних призводить до проблем з діагностуванням та подальшим контролем хвороби. Існують

недоліки, пов'язані з низькою якістю сигналу, вони призводять до поганої фільтрації даних при фізичній активності, що може подавати неправдиві повідомлення про потребу надання першої невідкладної медичної допомоги бути досить неефективними або обмеженими в можливостях. Це може включати обмежений функціонал, складність у використанні, або недостатню точність даних. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити програмно-апаратну систему,

яка забезпечить надійний та точний моніторинг стану людини. Ця система може включати в себе сенсори для вимірювання різних фізіологічних показників, програмне забезпечення для аналізу цих даних, а також можливість передачі даних до аналізу або спільного хмарного сховища для подальшого використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження та публікації у сфері розроблення програмно-апаратної системи для моніторингу стану людини вказують на великий прогрес у цьому напрямку. Завдяки поєднанню різних передових технологій штучного інтелекту, датчиків, а також інтернету речей, сучасні системи можуть надавати докладну інформацію про фізичний стан та психологічний комфорт особи.

Деякі дослідження фокусуються на розробці носимих пристроїв, таких як смарт-браслети та сенсорні патчі, які мають змогу вимірювати пульс, температуру тіла, рівень стресу та інше. Інші вивчають можливості розширеної реальності для моніторингу психоемоційного стану людини. Прикладом новітнього покоління не дуже дорогих систем моніторингу параметрів серця, що можна носити, і які все частіше використовують у повсякденному житті є пристрій Cardiac Insignia Cardea Solo. Після завершення періоду моніторингу цей патч, який пацієнт носить на тілі, розривається, щоб отримати модуль даних, який вставляють в пристрій для зчитування та завантаження даних. Програмне забезпечення автоматично створює звіти на основі даних із формами сигналів для різних показників серцево-судинної системи.

Система моніторингу на основі сенсорів отримують всю необхідну інформацію про стан здоров'я пацієнта через електронний сигнал даних, після чого сповіщає пацієнта за допомогою звукового сигналу.

Вченими була запропонована нова архітектура переносимої на зап'ясті мережі тіла (WBAN) з використанням обчислень в хмарних середовищах. Але значним недоліком цієї системи є те, що вона підключається за допомогою дроту [7]. Можливість виготовлення пристрою з бездротовим зв'язком дає змогу підвищити гнучкість системи і зробити використання системи зручнішими.

Система моніторингу на основі мікроконтролеру. Вони мають малі розміри, тому стали дуже корисними для швидкої обробки даних датчиків. Платформа Raspberry Pi є однією з найбільш розповсюджених у користуванні на основі мікроконтролерів у сфері систем моніторингу здоров'я. Існує деяка кількість систем моніторингу параме-

трів здоров'я на основі Arduino. Вони керуються через додаток в смартфоні, що є дуже зручним. Виміряні дані надсилаються на окрему плату Arduino Uno. За допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача аналогові значення, які надійшли до системи, перетворюються в цифрові. У системі використовується модуль Bluetooth, який не має великого радіуса дії, і за допомогою нього цифрові значення передаються на смартфон [8]. Існує розроблене рішення дослідником Сабіром (Sabbir) для хворих на цукровий діабет m-Health [9]. Це система створена для домашнього використання. Даний пристрій дає змогу хворому на цукровий діабет контролювати стан свого здоров'я, дієту, фізичні навантаження, дозу інсуліну та має можливість консультуватися з лікарями. Недоліком є те, що розроблена система не забезпечує якісної передачі даних, має малий час роботи [9].

Постановка завдання. Метою роботи є здійснення постійного моніторингу стану пацієнта для інформування про зміни його загального стану та попередження про можливі небажані наслідки.

Розроблення програмно-апаратної системи для моніторингу стану людини є актуальним напрямом сучасних досліджень та розробок у сфері охорони здоров'я, спорту, промислової безпеки та дистанційного спостереження. Зростаючий попит на рішення, що дозволяють в режимі реального часу оцінювати фізіологічні параметри організму, стимулює пошук оптимальних поєднань датчиків, обчислювальних модулів та комунікаційних технологій. Сучасні мікроконтролери мають достатню обчислювальну потужність для обробки багатопотокових даних, а широке розповсюдження бездротових стандартів зв'язку створює передумови для віддаленого контролю стану здоров'я у різних умовах. Водночас інтеграція апаратної частини з програмним забезпеченням дозволяє забезпечити не лише збір первинної інформації, а й її аналіз, візуалізацію та зберігання з мінімальною затримкою.

Виклад основного матеріалу. Проектування подібної системи починається з вибору набору сенсорів, які повинні забезпечувати необхідну точність та надійність вимірювань. Серед найбільш поширених параметрів – частота серцевих скорочень, рівень кисню в крові, температура тіла, артеріальний тиск та активність опорно-рухового апарату, електрокардіограма. Важливо обрати датчики з оптимальним співвідношенням ціни, енергоспоживання та стійкості до зовнішніх перешкод. Правильне розташування сенсорів на тілі

користувача та зручний кріпильний механізм забезпечують стабільний контакт і мінімізують похибки вимірювань, що є критично важливим для довготривалого моніторингу. На рис. 1 показано структурну схему моніторингу параметру пацієнта, яка складається з трьох рівнів – фізичного, логічного і прикладного. Перший рівень складається з датчиків, які використовуються для збору даних. Отримані дані на фізичному рівні обробляються на попередньому. Логічний рівень обробляє завдання щодо керування доступом до міжсенсорного зв'язку. Третій рівень виконує дії на основі оброблених даних, згенерованих логічним рівнем. Дана система дає точні дані, без затримки й перебоїв з сигналами

Програмна частина системи включає низку модулів, що відповідають за ініціалізацію апаратних компонентів, збір даних, їх попередню обробку, а також комунікацію з віддаленим сервером чи мобільним додатком. Для забезпечення гнучкості та масштабованості доцільно застосувати модульний підхід, коли кожен блок функціональності може бути оновлений або замінений без суттєвого втручання в інші частини системи. Використання популярних мов програмування для вбудованих систем, таких як C/C++ або Python на платформах із підтримкою мікровіртуальних середовищ, дає змогу швидко прототипу-

вати алгоритми обробки сигналів та алгоритми машинного навчання [2].

Особливу увагу приділено методам обробки сирих даних із сенсорів. Застосування фільтрів низьких та високих частот дозволяє відокремлювати сигнали корисного навантаження від шуму та артефактів руху. Додатково можуть використовуватися алгоритми виявлення аномалій для раннього попередження про можливі патологічні стани. Наприклад, зсув у частоті серцевих скорочень або різкі коливання температури тіла можуть сигналізувати про розвиток інфекційних процесів чи серцево-судинну дисфункцію. Вбудовані алгоритми аналізу здатні автоматично формувати сповіщення та рекомендації для користувача або медичного персоналу.

Для передачі зібраних даних найчастіше використовуються стандарти Bluetooth Low Energy, Wi-Fi або GSM/4G-модулі. На рис. 2 показана структурна система збору даних. На вхід СЗД потрапляють аналогові сигнали з датчиків фізичних величин. Тип і рівень аналогового сигналу залежить від фізичних особливостей датчиків, що використовуються. Зазвичай, сигнал малий за амплітудою, і в ньому наявні побічні шуми й перешкоди. Фільтр нижніх частот (ФНЧ) фільтрує сигнал і запобігає накладанню його спектрів. Нормуючий підсилювач погоджує за амплітудою

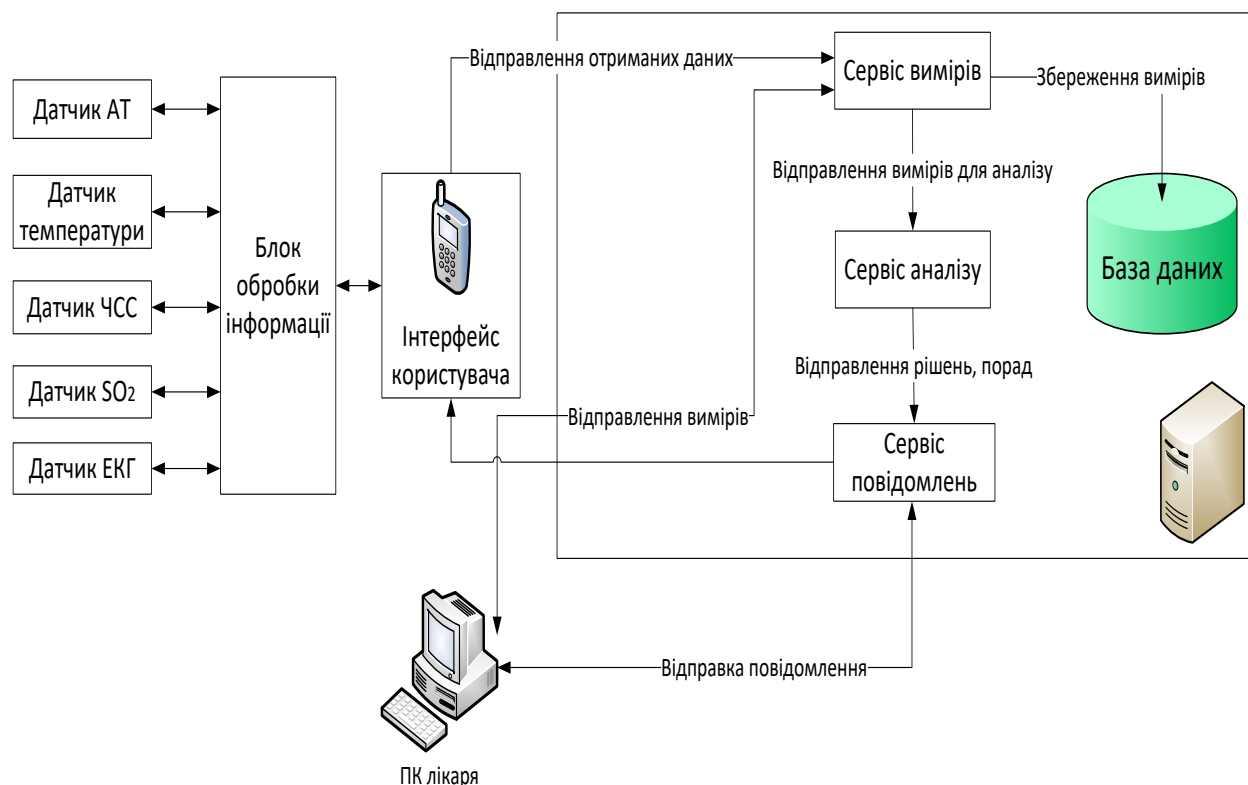


Рис. 1. Структурна схема моніторингу параметрів пацієнта

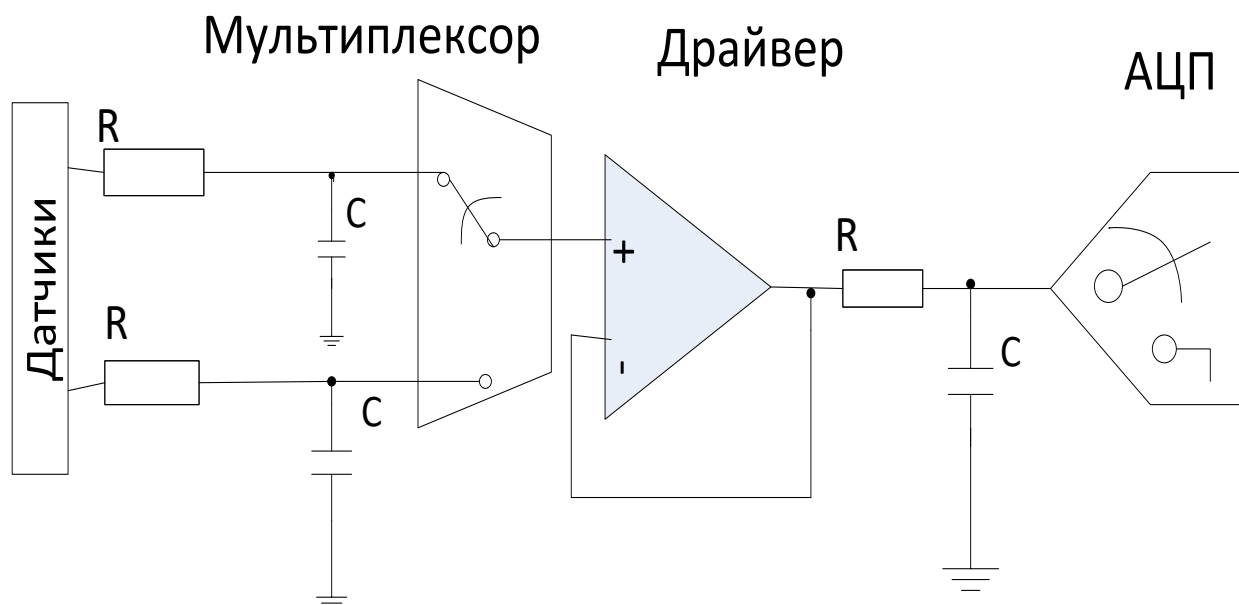


Рис. 2. Структурна система збору даних

сигнал первинного перетворювача з вхідним діапазоном АЦП.

Вибір технології залежить від завдань системи: для поблизу-короткодійного моніторингу достатньо Bluetooth-з'єднання із смартфоном, а для віддаленого спостереження – GSM-модулів з можливістю виходу в Інтернет. Організація безпечного каналу зв'язку передбачає застосування сучасних криптографічних протоколів, таких як TLS, а також механізми аутентифікації пристроїв для запобігання несанкціонованому доступу до персональних даних [1].

Живлення системи забезпечується, наприклад, літій-полімерною батареєю ємністю 2000 мА·год, що при середньому струмі споживання близько 20 мА гарантує автономну роботу протягом 80–100 годин. Зарядка батареї відбувається через вбудований зарядний модуль TP4056 зі струмом заряду до 1 А, що дає змогу поповнити ємність акумулятора за 2–3 години. В схемі передбачено захист від глибокого розряду та короткого замикання, що підвищує безпеку експлуатації.

Серверна частина системи відповідає за зберігання історичних даних, аналітику на основі великих обсягів інформації та формування довгострокових звітів. Використання реляційних або документно-орієнтованих баз даних залежить від структури отримуваних даних та запитів користувачів. Для аналізу великих обсягів інформації можуть застосовуватися інструменти бізнес-аналітики та платформи візуалізації, що надають можливість швидко оцінити динаміку фізіологічних

параметрів у графічному форматі. Автоматизовані звіти та щоденники стану допомагають лікарям і тренерам приймати обґрунтовані рішення [3].

Наприклад, застосовується архітектура IoT-рішення на базі AWS: шлюз AWS IoT Core приймає MQTT-пакети, після чого дані зберігаються в базі DynamoDB із середнім часом відповіді 5 мс. Для довгострокового зберігання сирових даних використовується Amazon S3, куди за 24 години завантажується близько 10 МБ даних з одного пристрою. Аналітику в реальному часі здійснює AWS Lambda-функція, що запускається при кожному надходженні нового запису та оцінює стан користувача за заздалегідь заданими порогами: середнє значення ЧСС за хвилину, SpO₂ нижче 92 % або температура понад 38 °C викликає тривожне сповіщення. Сповіщення надсилаються через AWS SNS у вигляді SMS або push-повідомлення мобільного додатка.

Розробка структурної схеми модуля бездротового зв'язку. Для розробки системи, в якій головними критеріями є енергоефективність бездротових вузлів, довгий час автономної роботи, надійність і стабільність бездротового каналу передачі даних, найбільш актуальною є бездротова технологія обміну даними Bluetooth. У запропонованій системі-на-кристалі nRF82540 наявна підтримка протоколу Bluetooth. Для здійснення операцій з передавання даних по бездротових вузлах та створення бездротової мережі на базі цих вузлів було вибрано протокол Bluetooth 5, який має кілька позитивних особливостей у сукупності

з апаратними засобами системи-на-кристалі. Головним є те, що у модулі nRF82540 наявна підтримка Bluetooth mesh, що у подальшому дасть можливість вивести систему сенсорів на кращий рівень мережевої взаємодії. При використанні протоколу Bluetooth 5 передбачено швидкості обміну даними, яка відповідає 125 кбіт/с, 250 кбіт/с, 500 кбіт/с, 1 Мбіт/с і 2 Мбіт/с. Чутливість приймача, при швидкості 125 кбіт/с складатиме – 103 дБм, та при швидкості 1 Мбіт/с дорівнюватиме – 95 дБм.

Підсилення передавача даних знаходиться в межах від –20 до +8 дБм з можливим кроком налаштування в 4 дБм. Пікове споживання струму в режимі приймача містить 4,6 мА, а в режимі передавача – 4,8 мА на рівні підсилення в 0 дБ [10].

Структурну схему модуля бездротового зв'язку на базі системи-на-кристалі nRF82540 з основними параметрами для системи моніторингу та інтерфейсами підключення наведено на рис. 3.

Підключення різних інтерфейсів дає можливість побудувати різні вузли мережі. Вимірювальний вузол передбачає підключення дротового каналу UART і бездротового каналу Bluetooth. Координатор мережі передбачає підключення бездротового каналу Bluetooth і додат-

кових модулів, до дисплею, пам'яті та додаткових елементів керування. Також координатор у певних прикладних задачах вимагає підключення дротового каналу для зв'язку з ПК. Третім є вузол керування, він дає можливість підключати необхідні вузли до ПК. При цьому, вузол керування передбачає підключення бездротового каналу Bluetooth і дротового каналу USB для з'єднання ПК [11].

Інтерфейс користувача відіграє важливу роль у забезпеченні зручності експлуатації системи. Мобільні та веб-додатки повинні бути інтуїтивно зрозумілими і базуватися на простих принципах навігації. Користувачу важливо отримувати чітку інформацію про поточний стан, попередження про можливі ризики та рекомендації для покращення самопочуття. Наявність історії показників у вигляді лінійних графіків або табличних форм дозволяє слідкувати за змінами стану здоров'я протягом тривалого періоду [5].

Особливою вимогою є забезпечення безпеки та конфіденційності даних користувача. Збір медичної інформації підпадає під особливі регуляторні норми, тому система повинна відповідати нормативам захисту персональних даних. Шифрування даних на всіх етапах – від сенсора до серверу – є обов'язковим. Важливо також реалізувати меха-

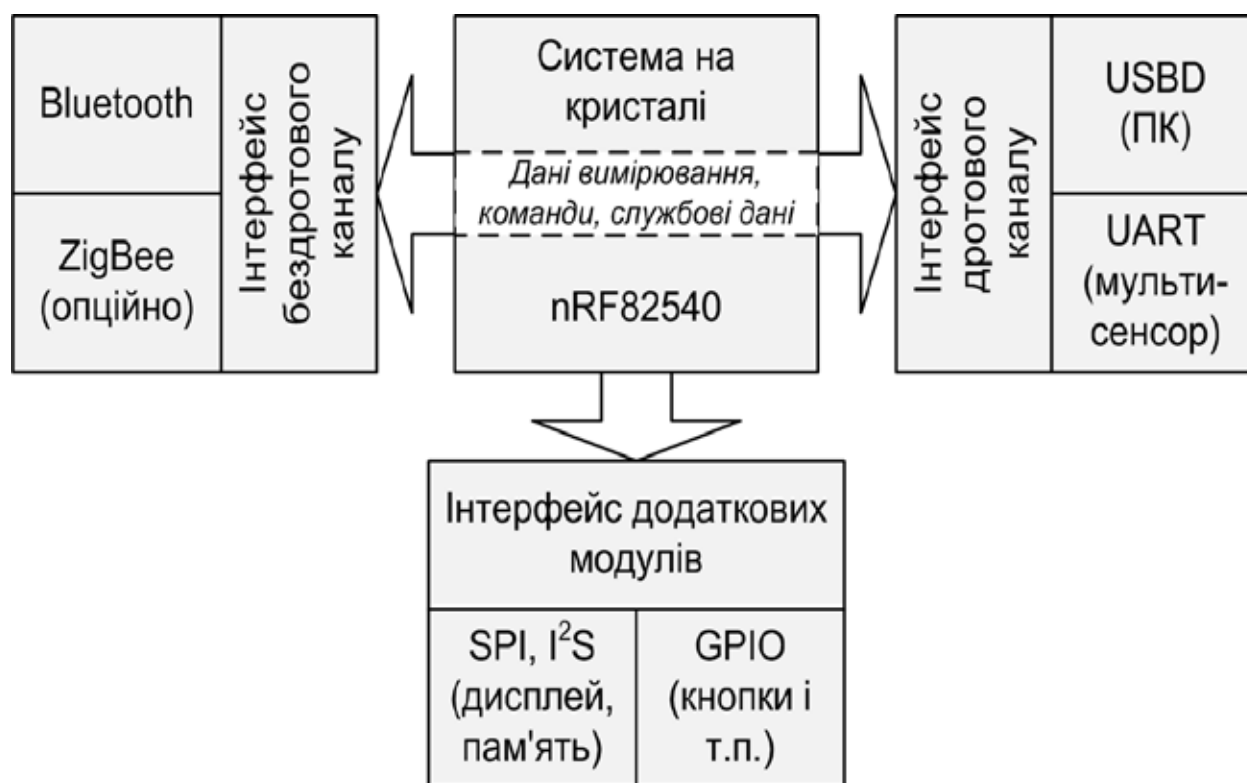


Рис. 3. Структурна схема модуля бездротового зв'язку на базі системи-на-кристалі nRF82540

нізми резервного копіювання та аварійного відновлення інформації на випадок технічних збоїв або втрати з'єднання [6].

Висновки. Розроблена система демонструє здатність до подальшого масштабування: додавання нових типів сенсорів, інтеграція з медичними інформаційними системами та розширення аналітичних можливостей завдяки штучному інтелекту. Наступними кроками стануть автоматичне прогнозування загострень хронічних захворювань та адаптивні рекомендації на основі поведінкових патернів користувача. Такий підхід сприятиме підвищенню якості медичного обслу-

говування та створенню умов для персоналізованої охорони здоров'я. До переваг розроблення такої системи можна віднести забезпечення постійного моніторингу стану людини, швидку реакцію на зміни в цьому стані, можливість збереження та аналізу даних для подальшого використання у медичних цілях або для підтримки здорового способу життя. Успішне розроблення програмно-апаратної системи для моніторингу стану людини може значно покращити якість життя людей, забезпечуючи їм інформацію про їхні фізіологічні показники та допомагаючи у збереженні здоров'я.

Список літератури:

1. Ігнатенко А.А., Основи програмування мовою JavaScript: тексти лекцій. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. 83 с.
2. Методика визначення кисню в артеріальній крові людини. О. А. Чичкан та ін. ; за заг. ред Ю. Р. Йосипова. Львів : ЛДУВС, 2023. 8 с.
3. Deng, Z.; Guo, L.; Chen, X.; Wu, W. SmartWearable Systems for Health Monitoring. *Sensors* 2023, 23, 2479. URL: <https://doi.org/10.3390/s23052479> (дата звернення 08.05.2025)
4. Sun, X.; Guo, X.; Gao, J.; Wu, J.; Huang, F.; Zhang, J.-H.; Huang, F.; Lu, X.; Shi, Y.; Pan, L. E-Skin and Its Advanced Applications in Ubiquitous Health Monitoring. *Biomedicines* 2024, 12, 2307. URL: <https://doi.org/10.3390/biomedicines12102307> (дата звернення 08.05.2025)
5. Raspberry Pi. URL: <https://www.raspberrypi.org/about/> (дата звернення: 07.05.2025)
6. Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/en/about> (дата звернення: 07.05.2025).
7. Тріпаті В., Шакіл Ф. (2017). Моніторинг системи охорони здоров'я за допомогою Інтернету речей – бездоганне поєднання. Міжнародна конференція з комп'ютерних та інформаційних систем наступного покоління (ICNGCIS), 2017 р., с. 153-158.А
8. Семко, О. В. «Сенсорна сервіс-орієнтована мережа телемедичної системи моніторингу стану серцево-судинної системи.» Сучасний захист інформації 4 (2016): 111-115.
9. Мехта Д.Д., Занарту М., Фен С.В., Чейн Х.А., Хілман Р.Е. (2012). Мобільний голосовий моніторинг здоров'я за допомогою носимого датчика акселерометра та платформи для смартфона. *IEEE Transactions on Biomedical*
10. Брайко Ю.О., Імамутдінова Р.Г. Основні системні вимоги до інтелектуальних приладів, методологія їх проектування. // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2013, № 12. – С. 73–82.
11. A. Mutlag, M. K. Abd Ghani, N. Arunkumar, M. A. Mohammed and O. Mohd, "Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems", *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 90, pp. 62-78, Jan. 2019. Engineering, с. 3090-3096. Devices

Bandurka L.M. DEVELOPMENT OF A SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM FOR MONITORING HUMAN CONDITION

One of the main reasons for high mortality due to diseases of the cardiovascular system among the population is the lack of high-quality monitoring of the course of the patient's body condition, and the inability to timely detect the deterioration of the patient's health to prevent undesirable consequences. The current task is to create systems for monitoring the vital parameters of the human body, which will allow measuring the functionality of the body, analyzing information, and thereby preventing undesirable consequences and preventing diseases. Therefore, the development and implementation of monitoring systems for timely information about changes in the human body and warning about possible undesirable consequences is a current task.

This is especially important for the elderly, military personnel, and people who are performing dangerous and complex activities. Wireless systems for monitoring human body parameters allow improving the quality of diagnostics, as they provide greater convenience and mobility for the user (the patient may be in a remote location from the hospital). With the help of remote monitoring, the doctor can continuously monitor the main parameters of the system, and respond in time in case of their violation, and prescribe treatment, additional treatment, or make a decision to hospitalize the patient.

With the help of these systems, the doctor can observe in which types of activity the patient's indicators deteriorate, then the patient can change his lifestyle and avoid undesirable consequences and the occurrence of the disease.

The article proposes a software-hardware system for remote monitoring of the human body, which can be used in various life situations: from monitoring the condition of patients in hospitals to controlling the loads of athletes during training. In production conditions, it is able to warn about overload and dangerous working conditions, reducing the risk of accidents. For people with chronic diseases, the system can become a means of self-monitoring and a reminder to take medication or visit a doctor.

Key words: remote monitoring, sensors, data collection, physiological parameters of the body, wireless network, sensor.

Дата надходження статті: 23.07.2025

Дата прийняття статті: 31.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.382.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/05>**Білевський П.С.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ РЕГУЛЯТОРІВ НАПРУГИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ МІКРОСИСТЕМ

У статті розглянуто проблему забезпечення стабільного та ефективного електроживлення мікросистем в умовах нестабільного або ізолюваного енергопостачання. З огляду на зростаючу потребу в автономних та розподілених енергетичних рішеннях, досліджено ключові підходи до стабілізації напруги, зокрема використання лінійних, імпульсних та гібридних регуляторів. Особливу увагу приділено аналізу переваг і недоліків традиційних схем стабілізації та обґрунтовано необхідність створення гібридних регуляторів, що поєднують високу точність регулювання з мінімальними втратами енергії. Запропонована структура включає первинний імпульсний стабілізатор та вторинний лінійний регулятор, що дозволяє досягти точного регулювання вихідної напруги при високій енергоефективності. В основі розробленого рішення – адаптивний алгоритм управління, який забезпечує динамічну зміну режимів роботи залежно від навантаження, температури, умов експлуатації та наявності електромагнітних завад.

Проведене моделювання в середовищах LTspice, MATLAB/Simulink, ANSYS та інших інструментах електронного і теплового аналізу показало високі технічні характеристики гібридного регулятора: енергоефективність 92–97%, точність стабілізації $\pm 0.1\%$, час реакції до 50 мкс. Термостійкість системи підтверджена стабільною роботою в широкому температурному діапазоні – від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

Вивчено здатність до самодіагностики та автоматичного коригування параметрів, що особливо важливо для безперебійної роботи в автономному режимі. Порівняльний аналіз з комерційними аналогами компаній Texas Instruments, Analog Devices, Maxim Integrated та Vicor підтвердив вищу енергоефективність, компактність та функціональну гнучкість розробленої системи.

Запропоноване рішення має значний потенціал практичного впровадження у системах Інтернету речей (IoT), критичній інфраструктурі, телекомунікаціях, медицині, автономних енергетичних комплексах та мобільній електроніці. Подальший розвиток технології можливий шляхом інтеграції штучного інтелекту для самооптимізації режимів стабілізації та впровадження стандартизованих інтерфейсів керування енергоспоживанням, що відкриває перспективи масового застосування у високотехнологічних галузях.

Ключові слова: регулятор напруги, мікросистеми, стабілізація, енергоефективність, автономні системи, розподілена генерація.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток технологій мікроелектроніки та автономних систем висуває високі вимоги до якості електроживлення. Особливо гостро проблема забезпечення електроживлення постає в умовах нестабільної роботи централізованих енергосистем, коли мікросистеми повинні функціонувати в режимі енергетичних островів [1]. Регулятори напруги відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного функціонування електронних пристроїв,

особливо в умовах змінного навантаження та нестабільного вхідного живлення.

Необхідність оптимізації схем регуляторів напруги для мікросистем набуває особливої актуальності в контексті розвитку розподіленої генерації та автономних енергетичних комплексів [2]. Традиційні підходи до стабілізації напруги не завжди відповідають специфічним вимогам мікросистем щодо енергоефективності, габаритів та надійності.

© Білевський П.С., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Крім того, особливості роботи в ізолюваному режимі вимагають адаптації алгоритмів управління до змінних умов експлуатації [3].

Аналіз сучасних тенденцій показує, що оптимальні рішення для живлення мікросистем повинні забезпечувати не лише високу точність стабілізації, але й мінімальне енергоспоживання в режимах очікування, швидку реакцію на зміни навантаження та стійкість до електромагнітних завад. Зазначене особливо важливо для систем, що працюють в умовах обмеженого енергоресурсу або потребують тривалої автономної роботи.

Методологія дослідження. Дослідження базується на комплексному підході, що включає теоретичний аналіз, математичне моделювання та експериментальну перевірку. При проведенні дослідження використовувались методи схематичного аналізу, теорії автоматичного управління та оптимізації. Моделювання схем регуляторів напруги проводилось з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу електронних схем. Критеріями оптимізації слугували енергоефективність, точність стабілізації, швидкодія та стійкість до збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно, для стабілізації напруги в електронних системах використовуються лінійні та імпульсні регулятори.

Лінійні регулятори (Рис. 1) характеризуються простотою схематичного рішення, низьким рівнем пульсацій та високою швидкодією. Однак, їх основним недоліком є низька енергоефективність, особливо при великій різниці між вхідною та вихідною напругою, що обмежує їх застосування в автономних системах, де енергозбереження є критично важливим параметром.

Імпульсні регулятори (Рис. 2) забезпечують значно вищу енергоефективність завдяки викорис-

танням транзисторних елементів та енергонакопичувальних компонентів, таких як конденсатори та інші. Проте, вони характеризуються складнішою схемою управління, підвищеним рівнем електромагнітних завад та потенційною нестабільністю за певних умов роботи. Крім того, динамічні характеристики імпульсних регуляторів можуть бути недостатніми для живлення швидкодіючих мікросистем.

Особливо важливою є проблема забезпечення стабільного живлення в умовах ізолюваної роботи від основної енергосистеми [4]. В таких умовах регулятори напруги повинні адаптуватися до змінних параметрів джерела живлення та забезпечувати стабільну роботу при різних режимах навантаження [5]. Це вимагає розробки спеціалізованих алгоритмів управління режимами стабілізації та оптимізації параметрів силових схем.

Аналіз літературних джерел показує, що існуючі рішення не повною мірою відповідають специфічним вимогам мікросистем. Необхідні нові підходи, що поєднують переваги різних топологій регуляторів напруги та забезпечують адаптацію схем керування та алгоритмів стабілізації, до умов експлуатації в автономних та ізолюваних енергетичних системах.

Враховуючи вищезазначене, особливо актуальним є розвиток гібридних схем (Рис. 3) регуляторів напруги, що можуть динамічно переключатися між різними режимами роботи залежно від поточних умов [6].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка оптимізованих схем регуляторів напруги для забезпечення ефективного живлення мікросистем в умовах автономної роботи та нестабільного енергопостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати існуючі

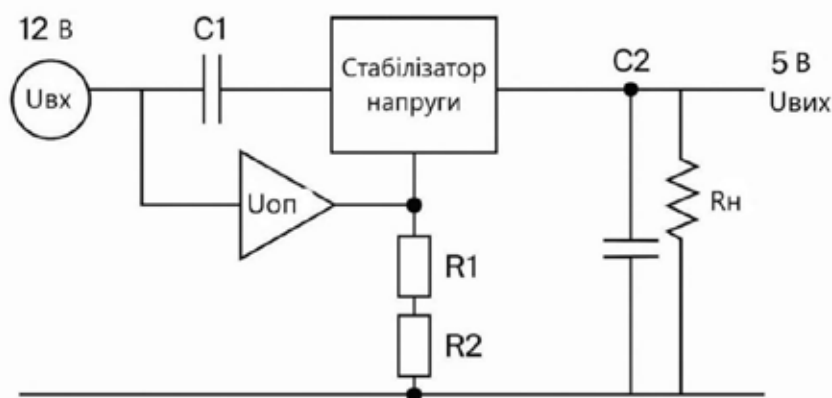


Рис. 1. Схема лінійного регулятора напруги

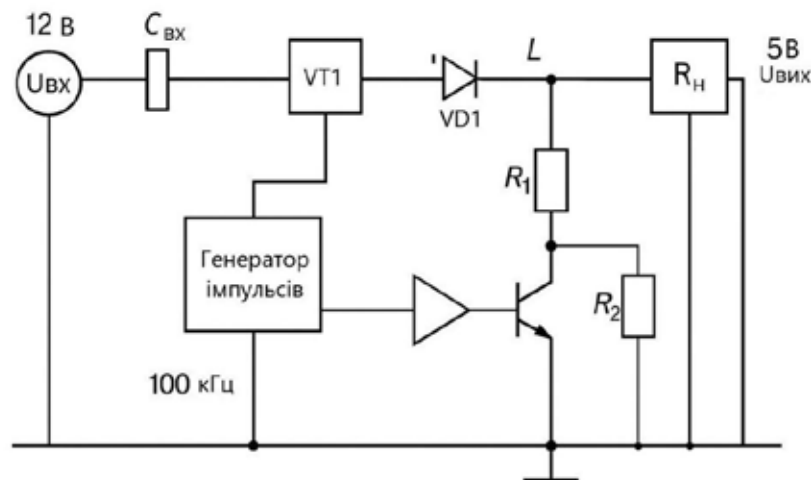


Рис. 2. Схема імпульсного регулятора напруги

топології регуляторів напруги та їх придатність для застосування в мікросистемах; дослідити вплив параметрів схеми на енергоефективність та якість стабілізації; розробити адаптивні алгоритми управління режимами роботи регулятора напруги для різних режимів роботи; запропонувати оптимізовану схему гібридного регулятора; провести моделювання та порівняльний аналіз характеристик розробленого рішення.

Виклад основного матеріалу. Аналіз специфічних вимог, що висуваються до мікросистем, показав необхідність розробки гібридного підходу до стабілізації напруги, що поєднує переваги лінійних та імпульсних регуляторів. Запропонована схема гібридного регулятора напруги (Рис. 3)

базується на адаптивному алгоритмі управління енергоспоживанням і режимами стабілізації, який дозволяє системі динамічно переключатися між різними режимами роботи, в залежності від поточних умов навантаження та параметрів вхідного живлення.

Основою розробленого рішення є модульна архітектура системи живлення, що включає первинний імпульсний стабілізатор (Рис. 2) напруги та вторинний лінійний регулятор (Рис. 1) тонкого налаштування вихідного рівня напруги. Такий підхід забезпечує високу енергоефективність регулятора при збереженні відмінних динамічних характеристик системи живлення та низького рівня пульсацій вихідної напруги.

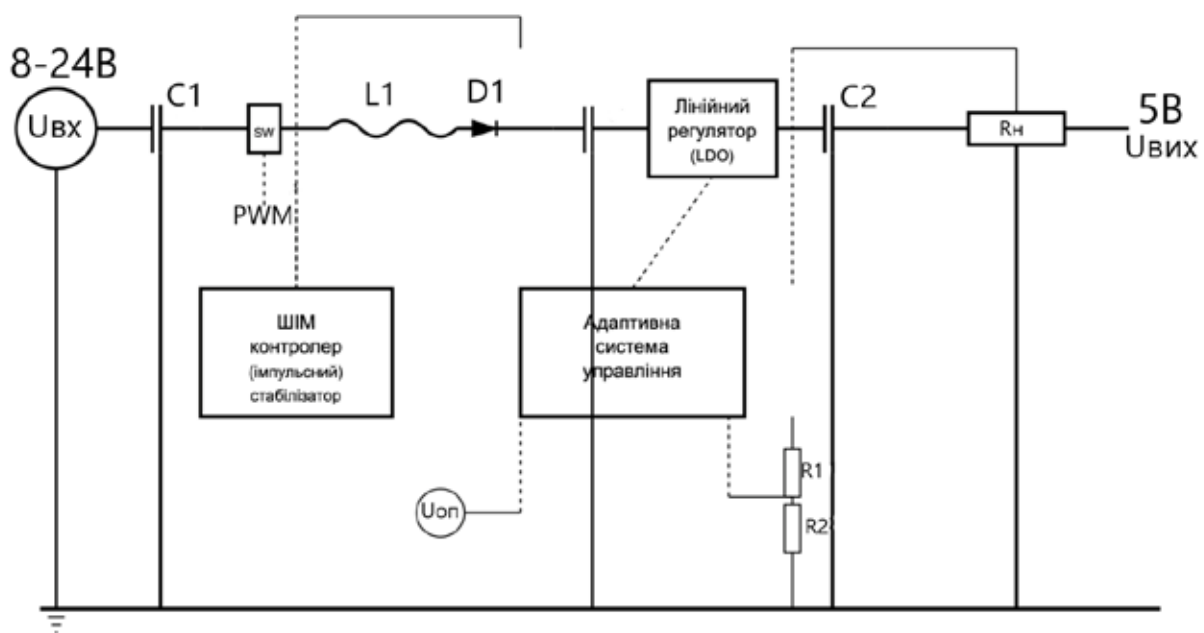


Рис. 3. Схема гібридного регулятора напруги

Первинний стабілізатор працює на відносно низькій частоті перемикання, що мінімізує втрати на перемикання, а вторинний регулятор компенсує залишкові пульсації та забезпечує точну стабілізацію.

Ключовою особливістю розробленої схеми регулятора напруги є система адаптивного управління режимами роботи, що аналізує параметри навантаження та автоматично оптимізує режим роботи. При легкому навантаженні на мікросистему, система переходить в режим підвищеної енергоефективності з періодичним вимкненням деяких блоків. При підвищеному навантаженні на вихід регулятора активуються додаткові канали живлення для забезпечення необхідної потужності системи.

Система контролю якості живлення включає моніторинг рівня пульсацій, швидкості зміни напруги та температурного режиму. За результатами аналізу цих параметрів відбувається корекція алгоритму управління модулем стабілізації для забезпечення оптимальних характеристик вихідної напруги в конкретних умовах експлуатації. Особливу увагу приділено забезпеченню стабільної роботи гібридного регулятора в перехідних режимах, що критично важливо для живлення чутливих мікросистем [7].

Адаптивні алгоритми управління. Розроблена система управління гібридним регулятором напруги (Рис. 3) базується на багаторівневому підході, що включає первинне управління потужністю енергетичних блоків, вторинне управління якістю напруги та третинне управління оптимізацією енергоефективності всього регулятора. Первинний рівень забезпечує базову стабілізацію напруги з використанням класичних алгоритмів управління.

Вторинний рівень здійснює корекцію динамічних характеристик вихідного каскаду та компенсацію збурень. Третинний рівень оптимізує параметри роботи регулятора напруги для мінімізації енергоспоживання.

Алгоритм адаптації параметрів регулятора базується на аналізі статистичних характеристик навантаження та вхідного живлення.

Система накопичує дані про типові режими роботи електронної мікросистеми та автоматично налаштовує параметри управління вихідними каскадами стабілізації для забезпечення оптимальних характеристик. Особливу увагу приділено прогнозуванню змін навантаження, що дозволяє заздалегідь підготувати систему до зміни режиму роботи.

Важливим елементом адаптивного алгоритму є система діагностики та самотестування регулятора напруги. Регулярний моніторинг ключових параметрів дозволяє виявити потенційні проблеми на ранній стадії роботи мікросистем та автоматично ввести корекції в алгоритм управління, що особливо важливо для систем, що працюють в автономному режимі тривалий час, без можливості технічного обслуговування.

Алгоритм також включає функцію адаптації алгоритму керування до умов ізольованої роботи регулятора напруги [8]. При відключенні від основної мережі система автоматично переходить в режим автономної роботи з корекцією параметрів стабілізації. Це забезпечує безперервне живлення критично важливих мікросистем навіть в умовах нестабільної роботи енергосистеми.

Результати проведеного моделювання гібридного регулятора напруги.

Моделювання характеристик гібридного регулятора напруги проводилось з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для схемотехнічного аналізу, включаючи SPICE-симулятори (LTspice, PSpice), середовища проектування аналогових схем (Cadence Virtuoso, Synopsys HSPICE), а також інтегрованих платформ для моделювання силової електроніки (MATLAB/Simulink Power Electronics Toolbox, PLECS). Для аналізу теплових режимів використовувались засоби термічного моделювання (ANSYS Icepak, FloTHERM), а верифікація алгоритмів управління енергетичними режимами здійснювалась в середовищах реального часу (MATLAB/Simulink Real-Time, dSPACE).

Проведені дослідження показали значні переваги розробленого підходу порівняно з традиційними рішеннями. Енергоефективність гібридного регулятора склала 92–95% в широкому діапазоні навантажень, що на 15–20% перевищує показники лінійних регуляторів, та на 3–5% вища за показники традиційних імпульсних стабілізаторів. Особливо значне покращення спостерігається в режимах легкого навантаження, де енергоефективність розробленої системи досягає 97%.

Точність стабілізації вихідної напруги регулятора склала $\pm 0.1\%$ в статичному режимі та $\pm 0.3\%$ в динамічних режимах. Час встановлення перехідного процесу при стрибкоподібній зміні навантаження не перевищує 50 мкс, що забезпечує надійне живлення швидкодіючих мікросистем. Рівень пульсацій вихідної напруги знаходиться в межах 5–10 мВ при номінальному навантаженні.

Під час моделювання температурних характеристик, робота регулятора в діапазоні від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ була стабільною. Температурний коефіцієнт вихідної напруги не перевищував $50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, що забезпечує надійну роботу в різних кліматичних умовах.

Особливо важливим є збереження високої енергоефективності при підвищених температурах завдяки адаптивному алгоритму управління тепловими режимами.

Тестування стійкості до електромагнітних завад проводилось за допомогою програмного забезпечення. Дослідження показали відповідність розробленої системи живлення вимогам міжнародних стандартів. Система успішно пройшла випробування на стійкість до імпульсних завад, радіочастотних полів та кондуктивних завад.

Порівняльний аналіз з існуючими рішеннями.

Було проведено порівняння розробленого регулятора з комерційними аналогами, а саме таких фірм як:

1. Texas Instruments – TPS7A94 + TPS62125 (у парі)
2. Vicor – Power Modules (наприклад, PI3741)
3. Maxim Integrated – MAX17291 + MAX38902
4. Analog Devices – ADP5070 + LT3045

Таке порівняння з аналогами показало суттєві переваги розробленого регулятора напруги у всіх ключових параметрах. За енергоефективністю розроблене рішення перевищує найкращі комерційні зразки на 8–12%. Значна перевага в стабільності напруги та адаптивності до навантаження спостерігається в режимах змінного навантаження, де адаптивний алгоритм управління регулятором забезпечує оптимальну роботу в широкому діапазоні умов.

Габаритні характеристики розробленого регулятора на 25–30% менші за комерційні рішення, аналогічні за показником потужності, за рахунок оптимізації схемотехніки та використанню сучасної елементної бази, що критично важливо для майбутнього застосування в мініатюрних мікросистемах з обмеженим простором для розміщення компонентів живлення.

Вартість виробництва розробленого регулятора не перевищує рівня вартості комерційних аналогів, при значно кращих технічних характеристиках розробленої схеми. За рахунок оптимізації кількості компонентів та використанню стандартних елементів, що серійно випускаються. Масове виробництво дозволить додатково знизити собівартість на 15–20%.

Функціональні можливості розробленого рішення значно ширші за можливості традиційних

регуляторів за рахунок закладених функцій діагностики, адаптації та дистанційного моніторингу.

Таке рішення забезпечує можливість інтеграції в інтелектуальні системи управління енергоспоживанням та підвищить загальну надійність системи.

Особливості застосування регулятора напруги в автономних системах.

Розроблений гібридний регулятор напруги (Рис. 3) особливо ефективний для застосування в автономних енергетичних системах, де критично важливими є енергоефективність та надійність. Адаптивний алгоритм управління регулятором має автоматично оптимізувати роботу системи живлення залежно від доступної потужності джерела живлення, що особливо актуально для систем на відновлюваних джерелах енергії.

Закладена функція пріоритизації навантажень, дозволить автоматично відключати менш критичних споживачів електроенергії, при зниженні доступної потужності, що надає можливість забезпечити безперервне живлення найважливіших мікросистем навіть в умовах обмеженого енергоресурсу. Алгоритм враховує як поточне споживання напруги, так і прогнозовані зміни навантаження.

Інтеграція гібридного регулятора з системами накопичення енергії забезпечує оптимальне використання акумуляторів. Регулятор напруги автоматично переключатиметься між режимами заряду та розряду, в залежності від доступності первинного джерела енергії та поточного споживання, що подовжує час автономної роботи системи та підвищуватиме ресурс акумуляторів.

Особливо важливою є закладена функція роботи регулятора напруги в мережах постійного струму різної конфігурації.

Регулятор зможе працювати як в централізованих, так і в розподілених системах живлення, автоматично адаптуючись до топології мережі та параметрів інших підключених пристроїв.

Перспективи розвитку та практичного застосування. Результати дослідження відкривають широкі можливості для практичного застосування гібридних регуляторів напруги в різних галузях. Особливо перспективним є використання розробленої системи в системах інтернет речей, де необхідне надійне живлення великої кількості розподілених мікросистем.

Адаптивні властивості майбутнього регулятора надають можливість забезпечувати оптимальну роботу мікросистем в умовах змінних вимог до енергоспоживання.

Подальший розвиток технології живлення може включати інтеграцію штучного інтелекту для прогнозування режимів роботи регулятора та оптимізації параметрів управління. Машинне навчання дозволить системі в подальшому накопичувати дані/показники щодо роботи та автоматично покращувати алгоритми управління живленням для конкретних умов застосування.

Мініатюризація компонентів регулятора напруги надає можливості для створення інтегрованих рішень на основі спеціалізованих мікросхем, що дозволить додатково зменшити габарити та вартість системи живлення при збереженні всіх функціональних можливостей. Розробка спеціалізованих контролерів може забезпечити ще більшу енергоефективність та швидкодію регулятора.

Стандартизація інтерфейсів управління та моніторингу енергоспоживання сприятиме широкому впровадженню запропонованої технології в різних застосуваннях. Розробка відкритих протоколів комунікації надає змогу забезпечити сумісність з існуючими системами управління та моніторингу енергоспоживання.

Висновки. Проведені дослідження та моделювання підтвердили ефективність запропонованого підходу до оптимізації схем регуляторів напруги для живлення мікросистем. Спроектований гібридний регулятор з адаптивним управлінням забезпечує значне покращення енергоефективності при збереженні високої точності стабілізації вихідної напруги та швидкодії.

Основними досягненнями роботи є:

- розробка адаптивного алгоритму управління регулятором напруги, що надає змогу авто-

матично оптимізувати параметри роботи відповідно до умов експлуатації;

- створення гібридної схемотехніки, що поєднує переваги різних типів регуляторів;

- забезпечення високої енергоефективності гібридного регулятора напруги в широкому діапазоні навантажень;

- реалізація функцій діагностики та самотестування для підвищення надійності системи живлення мікросистем.

Розрахунки та результати моделювання показали суттєві переваги розробленого рішення порівняно з його існуючими аналогами за всіма ключовими параметрами. Енергоефективність регулятора становила 92–95%, точність стабілізації вихідної напруги $\pm 0.1\%$ та час встановлення перехідного процесу менше 50 мкс, що буде забезпечувати надійне живлення найвимогливіших мікросистем.

Практичне значення роботи полягає в можливості створення високоефективних систем живлення для автономних та ізованих енергетичних комплексів. Розроблена технологія гібридного регулювання напруги буде особливо актуальною для систем критичної інфраструктури, що повинні забезпечувати безперервну роботу в умовах нестабільного енергопостачання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку спеціалізованих мікросхем для реалізації адаптивних алгоритмів управління гібридним регулятором напруги та створення стандартизованих рішень для масового впровадження систем живлення на основі гібридних регуляторів в різних галузях промисловості.

Список літератури:

1. Rettig E., Fischhendler I., Schlecht F. The meaning of energy islands: Towards a theoretical framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. № 187. С. 113732. DOI:10.1016/j.rser.2023.113732 (дата звернення: 15.07.2025).
2. Task Force. Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – X (as of May 24, 2023). URL: <https://surl.li/zeysrz> (дата звернення: 15.07.2025).
3. Chowdhury S., Ten S., Crossley P. Operation and control of DG based power island in Smart Grid environment / *Smart Grids for Distribution: Proceedings of CIRED Seminar*. 2008. URL: <https://doi.org/10.1049/ic:20080490> (дата звернення: 15.07.2025).
4. Trujillo C., Velasco D., Figueres E., Garcepa G. Local and Remote Techniques for Islanding Detection in Distributed Generators. *Distributed generation*. 2010. URL: <https://surl.li/dyguje> (дата звернення: 15.07.2025).
5. Zoby M., Yanagihara J. Analysis of the Primary Control System of a Hydropower Plant in Isolated Model. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2009. DOI: 10.1590/S1678-58782009000100002 (дата звернення: 15.07.2025).
6. Бурбело М. Й., Лебедь Д. Ю. Дослідження ефективності схеми керування напругою конденсатора уніфікованого регулятора якості електроенергії для зменшення коливань напруги. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 1. С. 21–28. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-166-1-21-28.
7. Андрушко С. Особливості регулювання режимів синхронного генератора, що забезпечує живлення розподільчої мережі, ізованої від енергосистеми. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи: матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.* 2024. URL: <https://surl.li/tzqdos> (дата звернення: 15.07.2025).

8. Штуць А., Зозуляк І., Балабан Д. Аналіз та дослідження методів і засобів діагностики ізоляції електрообладнання. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2024. Том 337, № 3(2). С. 79–84. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-18.

9. І. Фролов. Аналіз поточного стану енергосистеми та стратегії розвитку розосередженої генерації в Україні. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. № 67. С. 48–53. DOI: 10.15407/publishing2024.67.048 (дата звернення: 15.07.2025).

10. Головатий А. І., Теслюк В. М., Ріпак Н. С. Розроблення стабілізатора змінної напруги з мікроконтролерним управлінням. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2022. Т. 32. № 1. С. 79–84. DOI: 10.36930/40320112.

Bilevskyi P.S. OPTIMIZATION OF VOLTAGE REGULATOR SCHEMES FOR MICROSYSTEM POWER SUPPLY

The article considers the problem of providing stable and efficient power supply to microsystems in conditions of unstable or isolated power supply. Given the growing need for autonomous and distributed energy solutions, key approaches to voltage stabilization have been explored, in particular the use of linear, pulse and hybrid regulators. Particular attention is paid to the analysis of the advantages and disadvantages of traditional stabilization schemes and the need to create hybrid regulators that combine high control accuracy with minimal energy losses is substantiated. The proposed structure includes a primary pulse stabilizer and a secondary linear regulator, which allows you to achieve precise regulation of the output voltage with high energy efficiency. The developed solution is based on an adaptive control algorithm that provides a dynamic change of operating modes depending on the load, temperature, operating conditions and the presence of electromagnetic interference.

The simulation carried out in LTspice, MATLAB/Simulink, ANSYS and other electronic and thermal analysis tools showed high technical characteristics of the hybrid regulator: energy efficiency of 92–97%, stabilization accuracy $\pm 0.1\%$, reaction time up to 50 μs . The thermal resistance of the system is confirmed by stable operation in a wide temperature range – from -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$. The ability to self-diagnose and automatically adjust parameters has been studied, which is especially important for uninterrupted operation in autonomous mode. Comparative analysis with commercial analogues of Texas Instruments, Analog Devices, Maxim Integrated and Vicor confirmed the higher energy efficiency, compactness and functional flexibility of the developed system.

The proposed solution has significant potential for practical implementation in Internet of Things (IoT) systems, critical infrastructure, telecommunications, medicine, autonomous energy complexes and mobile electronics. Further development of the technology is possible through the integration of artificial intelligence for self-optimization of stabilization modes and the introduction of standardized interfaces for energy management, which opens up prospects for mass application in high-tech industries.

Key words: voltage regulator, microsystems, stabilization, energy efficiency, autonomous systems, distributed generation.

Дата надходження статті: 10.07.2025

Дата прийняття статті: 18.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Ikhsanov Sh.M.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Diakonov O.S.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

IMPLEMENTATION OF A REAL DATA TRANSMISSION CHANNEL BASED ON A SINGLE ADALM-PLUTO SDR PLATFORM

The paper analyzes the challenges of incorporating hardware platforms for software-defined radio (SDR) systems into the educational process while studying a range of disciplines related to electrical communication theory and the design of digital wireless systems.

Clearly, the use of these hardware platforms for educational purposes when studying wireless communication systems offers several advantages, such as a visual demonstration of how a radio system functions, the ability to conduct supplementary experiments related to radio wave propagation taking into account the hardware's drift characteristics, and so on.

The active learning module from Analog Devices, ADALM PLUTO SDR, was chosen as the hardware platform for the laboratory stand.

It is noted that in order to effectively study digital signal processing principles, a program framework should be created that includes the initialization code for the hardware platform, as well as the basic functionality of digital processing units used in real-world communication systems.

Using the demo programs provided with the MATLAB software, it has been demonstrated that they require significant refinement in order to create a working radio communication system.

Two signal processing approaches have been developed during the implementation of a QPSK-modulated data transmission system in order to address time synchronization issues.

A software implementation is provided for determining an additional shift in the signal constellation using Barker codes. This functionality can be used after initial synchronization and decoding to make a decision on whether to shift the signal constellation by a multiple of 90 degrees.

The results of the operation of the developed programs are presented, which demonstrate acceptable frequency shift reduction when synchronizing the receiver and transmitter within the same hardware platform ADALM PLUTO SDR. The shift estimation error is 0.01–0.03 Hz.

An analysis of the operation of an algorithm for estimating the frequency shift in the phase of a signal at different signal-to-noise ratios is presented. The operation of two synchronization algorithms (the algorithm for choosing between even and odd samples and the symbolic synchronization algorithm) for several transmitter power levels is also analyzed.

The data obtained allows us to conclude that error-free information transmission is possible in the data transmission channel under consideration with a signal-to-noise ratio of approximately 10 dB.

Key words: ADALM PLUTO SDR, Software-Defined Radio, QPSK, symbol synchronization, phase synchronization, Education, Communication systems, Modulation.

Formulation of the problem. To study wireless data transmission technologies more deeply, it is necessary to introduce software-defined radio (SDR) hardware platforms into the educational process, allowing for the implementation of a real communication channel with all digital signal processing units.

Analysis of recent research and publications. The recent development of SDR receivers and transmitters has made it possible to approach the study of

digital wireless communications on a more advanced level. In [6], the authors shared their experience in creating a course that focuses on the practical aspects of synchronization, including automatic gain control, frequency offset, and synchronization – common challenges in real-world communication systems. The article [5] explores the technical specifications of the ADALM-PLUTO SDR hardware platform and its suitability for setting up laboratory exercises on

receiving FM signals and designing radar systems. The authors in paper [4] propose a methodology for learning the fundamentals of radio transmitters and receivers through practical experiments with commercial SDR modules. Therefore, it can be concluded that, for a deeper understanding of the fundamentals of wireless communication system operation, the use of computer simulations has a less tangible benefit than the use of dedicated SDR hardware platforms.

Task statement. The aim of the work is to develop a software-defined radio data transmission system based on the MATLAB software product and the ADALM-PLUTO SDR hardware platform from Analog Devices. This lab setup can be used for studying advanced topics in wireless data transmission.

Outline of the main material of the study. The ADALM-PLUTO SDR Active Learning Module is an easy-to-use tool that is based on the AD9363 chip [1, 2]. It has one receiving channel and one data transmission channel that operate in the frequency range of 325 MHz to 3.8 GHz with a sampling frequency of 65 kHz to 61 MHz, and a bandwidth of 200 kHz to 20 MHz for the tunable channel. Quadrature information is transmitted between the platform and PC via USB 2.0 interface. A 12-bit analog-to-digital converter (ADC) is used. With special settings, the operating frequency range can be expanded from 70 MHz to 6 GHz [2]. The external and internal views of the platform are shown in Figure 1.

Support for the ADALM-PLUTO software-defined radio (SDR) hardware platform is available in MATLAB [3]. The following MATLAB demonstration programs are available:

- plutoradioQPSKTransmitterExample.m;
- plutoradioQPSKReceiverExample.m;

– plutoradioWLANTransmitReceiveExample.m.

In turn, these projects are based on the use of the Communications System Toolbox Support Package for ADALM-PLUTO Radio [3]. The programs can be used with Matlab versions R2017 and above. The plutoradioWLANTransmitReceiveExample project was designed to run on a single ADALM-PLUTO SDR and functions normally. As indicated by the names of the first two programs, they enable information exchange between two ADALM-PLUTO SDR platforms. Unfortunately, this project was initially introduced in Matlab R2017 and not operated properly. There are software errors when connecting to the hardware platform, and information is almost always completely distorted on the receiver. The project version presented in Matlab R2019 performs somewhat better, but a reliable channel between the two ADALM-PLUTOs is still not established. Typically, bit error rate (BER) ranges from 0.1 to 0.3 regardless of the signal-to-noise ratio (SNR). The program transmits the phrase “Hello, world” with numbers from 000 to 999.

The final result of the program is as follows:

Error rate is = 0.162003.

Number of detected errors = 444083.

Total number of compared samples = 2741200.

It can be assumed that the final phase correction of the signal with a multiplicity of 90 degrees was not implemented or was implemented with errors. This type of signal processing will be discussed below.

Implementation of the transmitting program and organization of information reception. This is one of the initializations of the ADALM-PLUTO SDR platform used in the plutoradioWLANTransmitReceiveExample.m program:

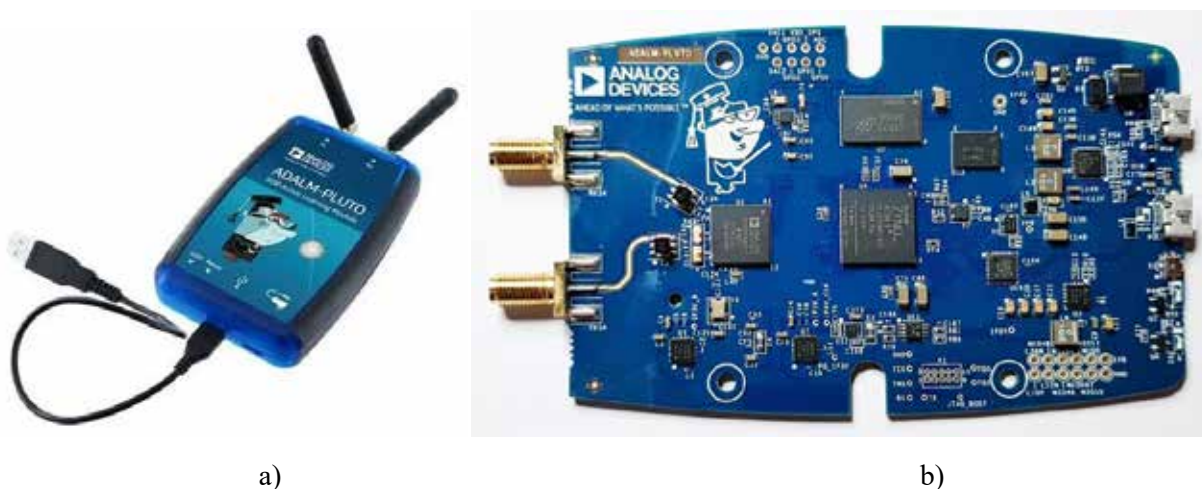


Fig. 1. The external (a) and internal (b) views of ADALM-PLUTO SDR


```
% Init ADALM PLUTO SDR:
USB = 'usb:0';
deviceNameSDR = 'Pluto'; % Set SDR Device
radio = sdrdev(deviceNameSDR); % Create SDR
device object
radio.RadioID = USB;
% Init transmitter:
sdrTransmitter = sdrtx(deviceNameSDR); % Create
transmitter object
sdrTransmitter.RadioID = USB;
% Init receiver:
sdrReceiver = sdr_rx(deviceNameSDR); % Create
receiver object
sdrReceiver.RadioID = USB;
```

In most real-world information transmission channels, signals are sent in bursts of a relatively short duration, at the start of which a synchronization pulse is usually transmitted for receiver time synchronization. The Barker code, with a maximum length of 13, is often used for this purpose. Barker codes have a minimum side lobe level in the autocorrelation function of $1/N$, where N is the length of the code.

```
% Create random data :
M=4;
infSize = 2^10;
txInf = randi([0 M-1],1,infSize);
% Insert Barker code before data packet:
Barker0 = [1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1];
% Bipolar Barker Code
BL=length(Barker0);
Barker=3*(1-Barker0)/2; % coding [1,-1]
using symbols [0,3]
txInf = [Barker,txInf]';
% Generate QPSK Signal:
symbol_order='gray';% 'bin'(default)/'gray'
ini_phase0=pi/4; % initial phase in rad before
transmitting
txWaveform = pskmod(txInf,M,ini_phase0,symbol_
order);
% Set the signal parameters^
% Resample the transmit waveform at 400 KHz
fs = 100e3; % Transmit sample rate in Hz
osf = 4; % Oversampling factor - QPSK
sdrTransmitter.BasebandSampleRate = fs*osf;
sdrTransmitter.CenterFrequency = 1.8500e9;
sdrTransmitter.ShowAdvancedProperties = true;
sdrTransmitter.Gain = -40;
```

The only thing that is more or less fundamental in this context is the value of the quantization frequency of the signal. This determines the duration of a single symbol, which is set to 10 microseconds in this example. Other parameters can be adjusted within acceptable limits for the ADALM-PLUTO SDR platform. The

duration of a symbol can also be changed, but this may significantly affect the characteristics of the channel.

A prepared signal must pass through a Square-Root Raised Cosine Filter, implementing as an upsampling FIR-filter:

```
% Generate square root raised cosine transmit
filter:
RCFiltSpan = 10; % Filter span of Raised
Cosine Tx Rx filters (in symbols)
SquareRootRaisedCosineFilterOrder =
osf*RCFiltSpan;
Rolloff = 0.5;
hTxFilt = fdesign.interpolator(osf, ...
'Square Root Raised Cosine', osf, ...
'N,Beta', SquareRootRaisedCosineFilt
erOrder, Rolloff);
hDTxFilt = design(hTxFilt, 'SystemObject', true);
TransmitterFilterCoefficients = hDTxFilt.
Numerator/2;
% Filter and resample transmit waveform:
TransmitterFilter = dsp.FIRInterpolator(osf,Tr
ansmitterFilterCoefficients);
txWaveform = TransmitterFilter(txWaveform);
```

The filter used in this experiment has a length of 41 samples. The filter coefficients for this filter are shown in the following graph (Fig. 2).

The filter increases the quantization frequency by a factor of 4. Therefore, for each of the 1037 bits (13 bits from the Barker code and 1024 information bits), four complex samples are generated in the program. The total number of samples prepared is therefore 4148. Additionally, the signal payload is padded with a pause equal to 1/16th of the signal's length payload and is transmitted continuously (in a cyclic manner):

```
% Add pause to signal payload:
kPause=infSize/4; % Since there are 4 samples
per symbol, the pause is 1/16 of the duration
of the signal
txWaveform(end+1:end+kPause)=0;
PacketLen=length(txWaveform);
% Cyclic infinite signal transmission:
sdrTransmitter.transmitRepeat();
```

At the receiver, the signal is received within the time required to receive a certain number of copies of the transmitted message. We will set the reception time so that at least three packets of information are received. Now, we do not need to artificially introduce a frequency shift. It is enough to separate the frequencies of the transmitter and receiver. This is done in the program using the *df* parameter. The receiver uses the same quantization frequency as the transmitter.

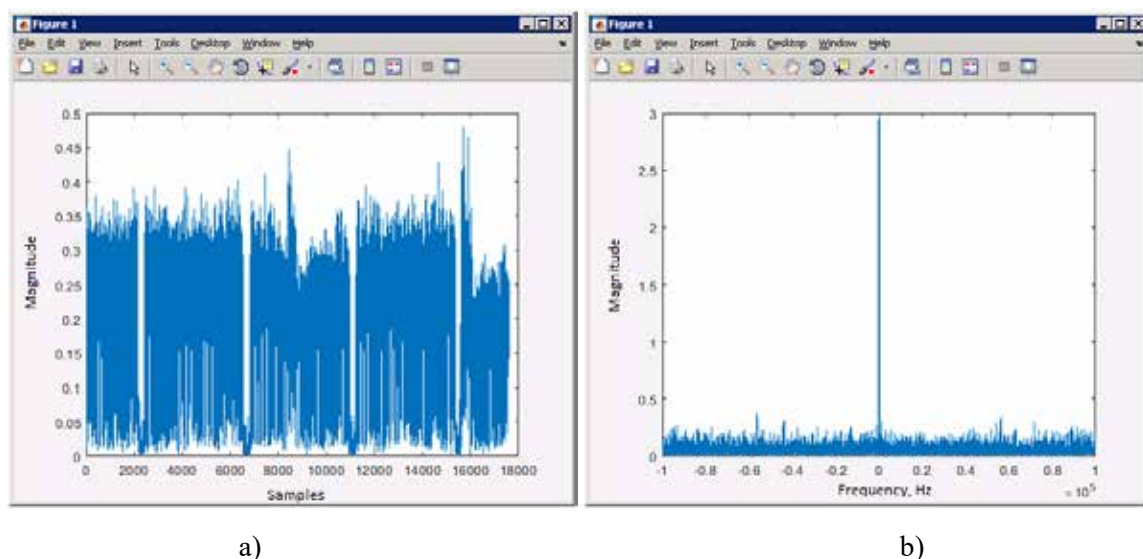


Fig. 2. Upsampling FIR-filter unnormalized impulse response

```
df=20000; % Shift of the receiver carrier
frequency relative to the transmitter (Hz)
sdrReceiver = sdrx(deviceNameSDR);
sdrReceiver.RadioID = USB;
sdrReceiver.BasebandSampleRate =
sdrTransmitter.BasebandSampleRate;
sdrReceiver.CenterFrequency = sdrTransmitter.
CenterFrequency+df;
sdrReceiver.GainSource = 'AGC Slow Attack'
sdrReceiver.OutputDataType = 'double';
kPacket=4; %
sdrReceiver.SamplesPerFrame =
PacketLen*kPacket;
% The transmitted waveform is captured using
the PlutoSDR
burstCaptures = sdrReceiver();
bCaptAbs=abs(burstCaptures);
% Received signal magnitude:
plot(bCaptAbs);
```

Automatic gain control slow attack is set for the received signal. The length of the received frame is 17616 complex samples, which includes the pause. The emitted signal has a length of 4404 samples. The magnitude of the received signal is shown in Fig. 3a.

The figure shows the pauses between message packets and significant unevenness in the magnitudes of the received signal, even within a single packet.

Primary elimination of the frequency shift across the signal spectrum. The received signal is passed through a 2-fold step-down receiving FIR-filter and, before the zones of individual packets are allocated, it enters the first stage of eliminating frequency shift. At this stage, the frequency shift will be estimated from the signal spectrum using the FFTFreqSynchr() function:

```
function [ dfest ] = FFTFreqSynchr(yM,
SampleRate)
% yM - the signal after removing information
phase jumps %(usually by exponentiating the
signal)
% SampleRate - quantization frequency in Hz
% dfest - frequency shift in Hz
Fs = SampleRate;
LyM=length(yM); % Signal spectrum
NFFT = 2^nextpow2(LyM); % number of FFT
filters
FM=fft(yM,NFFT); % spectrum
dFFT=Fs/NFFT; % FFT Filter Arrangement (Hz)
f=(0:dFFT:Fs-dFFT)'; % frequency axis marking
FMmod=abs(FM); % Magnitude spectrum of the
signal
% Define filter with maximum magnitude
[FMmodmax,kmax]=max(FMmod);
FMmod=FMmod/FMmodmax; % Normalization of the
signal to the
% maximum
% Draw a parabola through the maximum point of
the spectrum and
% two adjacent samples (filters f(1) and
f(NFFT) are adjacent)
if kmax == 1
    p=polyfit([-dFFT f(1:2)]',[FMmod(NFFT)
FMmod(1:2)]',2);
else
    f1=f-f(kmax-1); % shifting the frequency
axis to facilitate
% calculations in the least squares method
    if kmax == NFFT
        p=polyfit([f1(NFFT-1:NFFT)'
f1(NFFT)+dFFT]',...
[FMmod(NFFT-1:NFFT)'
FMmod(1)]',2);
```

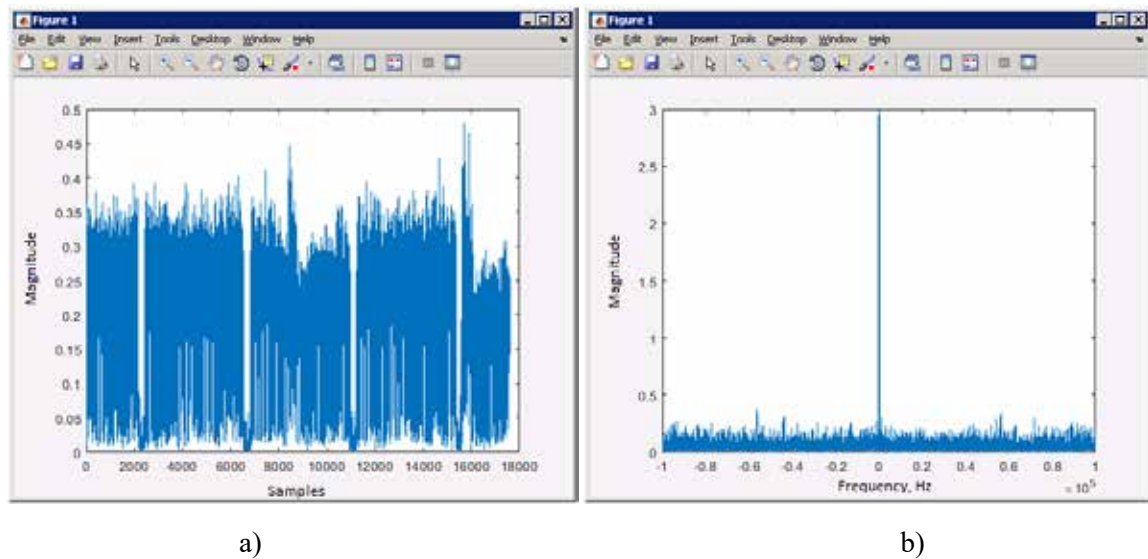


Fig. 3. Received signal magnitude (a), The spectrum of the fourth degree of the received signal (b)

```

else
    p=polyfit(f1(kmax-1:kmax+1),FMmod(kmax-
1:kmax+1),2);
end
end
dfest=-p(2)/(2*p(1)); % Estimation of
displacement as
% the vertex of a parabola:
if kmax > 1
    dfest=dfest+f(kmax-1);
end
if dfest > Fs/2
    dfest=dfest-Fs;
end
end

```

All functions used in this article were developed by the authors. In each specific case, the use of MATLAB library functions is described.

```

% Measuring and eliminating frequency shift:
SampleRate=sdrReceiver.BasebandSampleRate/2;
RxLen=length(RCRxSignal);
dt=1/SampleRate;
t=(0:dt:dt*RxLen-dt)';
RCRxSignalM = RCRxSignal.^M;
dfestSP = FFTFreqSynchr(RCRxSignalM,
SampleRate)/M;
fprintf('dfestSP0=%.4f.\n',dfestSP);
omeg=-2*pi*dfestSP;
RCRxSignal = RCRxSignal.*exp(1i*omeg*t);
FrameLen = length(RCRxSignal);

```

The spectrum of the fourth degree of the signal for the entire frame is shown in Figure 3b. Instead of

the interval $[0, F_s]$, the spectrum is now linked to the interval $[-F_s/2, F_s/2]$.

The shift estimate was -0.0138 Hz, which indicates a good match between the frequencies of the transmitter and receiver in the same ADALM PLUTO SDR device. With this signal-to-noise ratio, there are no bit errors in the channel. As with modeling, the estimate is practically independent of the signal-to-noise ratio.

Reducing the power of the transmitted signal by 14 dB leads to a spectrum as shown in Fig. 4a, with a BER of 10^{-1} .

For this spectrum, the estimated offset was -0.162 Hz. Adjusting the receiver frequency to the right should lead to the observation of a negative offset four times the difference, while adjusting to the left would lead to a positive offset. Indeed, when shifting to $+20$ kHz with good signal power (transmitter signal attenuation of 40 dB), we see the following spectrum of the fourth degree of the signal (Fig. 4b).

Our signal is observed at -4.20 kHz, as expected. The appearance of a signal at 20 kHz is associated with pauses between packets, and it is located 100 kHz away from the main signal. In the spectrum of the signal, this distance is 25 kHz, in accordance with the ratio of packet length and pause. The estimated frequency offset was -20000.96 Hz, with a slight increase in discrepancy relative to the previous case, probably due to nonlinearities in the hardware implementation of ADALM PLUTO SDR.

Allocation of zones using a convolution signal with a Barker code. Zones are assigned using the ConvBarker function.

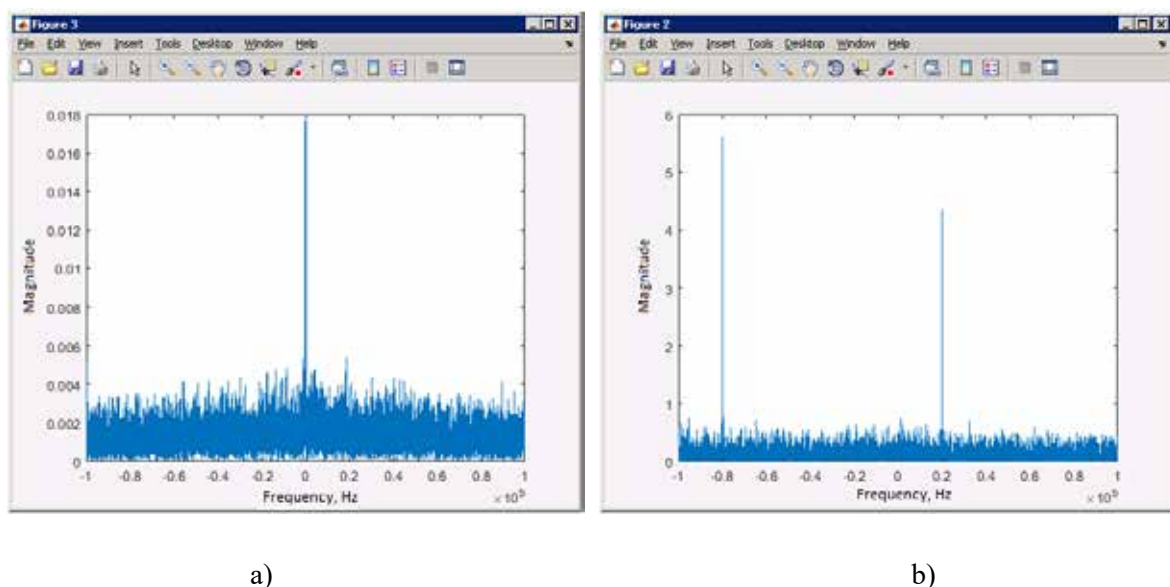


Fig. 4. The spectrum of the 4th degree of the received signal when the power is reduced by 14 dB (a), the spectrum of the 4th degree of the received signal when the receiver frequency is shifted by 20 kHz (b)

```
% Convolution with a Barker code:
ConvSignal = ConvBarker(RCRxSignal,ReceivOsf);
```

```
The text of the ConvBarker()function is as follows:
function ConvSignal = ConvBarker(RCRxSignal,
ReceivOsf)
%% Convolution function of a complex signal
with a Barker code
% ReceivOsf - the number of samples per symbol
in the received signal
% (Oversampling factor for received signal)
Barker0 = [1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1]; %
Bipolar Barker Code
BL=length(Barker0);
BL2 = ReceivOsf*BL;
Barker2=1:BL2; % Multiplying the Barker code
by the number of samples per symbol:
for i=1:BL
    Barker2((i-1)*ReceivOsf+1:i*ReceivOsf)=
    Barker0(i);
end
% Convolution as the product of a row per
column:
FrameLen = length(RCRxSignal);
ConvSignal=(1:FrameLen-BL2+1)';
for i=1:FrameLen-BL2+1
    ConvSignal(i) =
    Barker2*RCRxSignal(i:i+BL2-1);
end
end
```

The result of the convolution process is shown in Figure 5. Now, the beginning of each packet is clearly visible, and we can easily determine the number of

packets. To do so, it is sufficient to call the specially designed SearchPackets() function.

```
[Mind,kFoundPackets] = SearchPackets(ConvAbs,
kPacket,PacketLen,kPause);
```

The text of the package search function is as follows:

```
function [Mind,kFoundPackets] = SearchPackets
(ConvAbs,n,PacketLen,kPause)
%% A function for searching for packets with
the Barker code at
% the beginning ConvAbs - the amplitude of the
complex signal
```

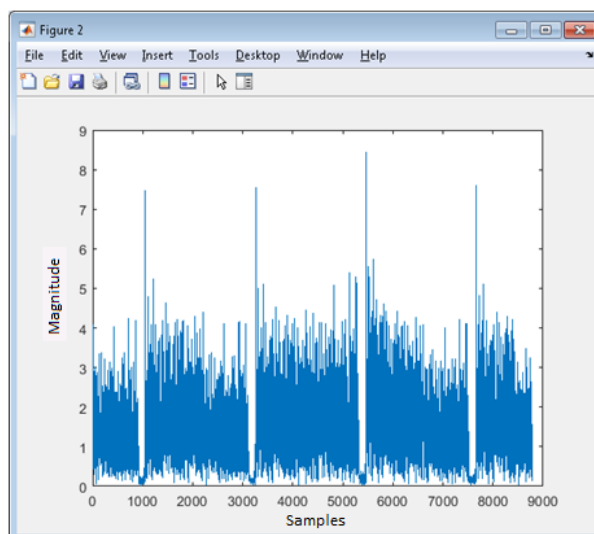


Fig. 5. The result of the convolution of the received information packets with the Barker code

```

% convoluted with the Barker code
% n - number of packets to search for
% PacketLen - packet length, kPause - pause
between packets
% kFoundPackets - number of packets found
% Mind - packets start indexes
Pqs=8; % threshold for the Barker convolution
relative to the
% signal area (dB)
Pqp=15; % threshold for the Barker convolution
relative to the
% pause zone (dB)
ConvLen=length(ConvAbs);
% Searching for a set number of maximum
samples in a signal:
[MConvSignal,Mind] =
fewmax(ConvAbs,n,PacketLen);
qs(1:n)=0; % the ratio of the maximum reading
to the average
% level in a packet (dB)
qp(1:n)=0; % the ratio of the maximum count to
the average level
% in the pause (dB)
kFoundPackets=0;
for i=1:n
    i1=Mind(i)+1; i2=i1+PacketLen-2;
    j2=i1-2; j1=max(j2-kPause/2+1,1);
    if i2 <= ConvLen
        qs(i)=20*log10(MConvSignal(i)/
mean(ConvAbs(i1:i2)));
    else
        qs(i)=0;
    end
    if j2-j1 >= 0
        qp(i)=20*log10(MConvSignal(i)/
mean(ConvAbs(j1:j2)));
    else
        qp(i)=0;
    end
    fprintf('qs=%0.2f, qp=%0.2f\n',qs(i),qp(i));
    if qp(i) >= Pqp && qs(i) >= Pqs
        kFoundPackets = kFoundPackets+1;
        Mind(kFoundPackets) = Mind(i);
    end
end
Mind = Mind(1:kFoundPackets); Mind =
sort(Mind);
End

```

First of all, we note that the function searches for packets of known length with a given pause length between them. The program input receives the amplitude of the signal convoluted with the Barker code. First, the beginning of each packet is determined by the maximum samples. To do this, the `fewmax()` function is written, which searches for a given num-

ber of maximum elements in a valid array. To avoid a situation where there may be several maxima on one packet, the maximum found is excluded from further search along with `PacketLen` samples on the right and `dl` (assumed to be 5) samples on the left. The number of required maxima corresponds to the maximum number of packets that can be received in one frame. The main criterion for selecting a packet is a sufficient level of convolution with the Barker code relative to the average level of packet magnitudes and the presence of a sufficiently deep pause after the packet (8 and 15 dB, respectively, recall that for the Barker code used, the theoretical level of the side lobes does not exceed $20\lg(1/13) = -22$ dB).

After selecting packet zones to prevent exceeding the dynamic range, the signal is normalized to the average as well as calculating the average signal-to-noise ratio in the pauses between packets. The last characters in each packet are distorted by convolution with a pause during filtering and so they should be removed.

```

% Normalization of the signal to the average
level
% and deletion of the last characters:
RCRxSignal=RCRxSignal/mean(abs(RCRxSignal));
SignalM=RCRxSignal.^M;
NFFT=PacketLen0/4-5; % the last ~10 samples in
each packet of the RCRxSignal filtered array
are distorted
due to convolution with pause
NFFT1=2*NFFT;
SampleRate=sdrReceiver.BasebandSampleRate/4;
% Calculating the average signal-to-noise
ratio:
MeanNoise = CalcNoise(abs(RCRxSignal),Mind,kFo
undPackets,PacketLen,kPause);

```

Packet time synchronization (symbol synchronization). Further processing is carried out separately for each packet. If we build a signal constellation for individual packets at this stage, we will see that the signal, in addition to the resulting phase shift, is practically scattered over the entire complex plane, despite a significant SNR of about 14 dB (Fig. 6).

It should be noted that the program uses a 45-degree rotation of the phase plane (in `_phase0` parameter), so the centers of the symbols of the transmitted signal are located on the bisectors of the coordinate quarters.

Let's consider two signal processing options that are aimed at eliminating time synchronization violations. In the first variant, we will use the MATLAB `comm.SymbolSynchronizer()` function, in the second variant, we will consider the method widely used in

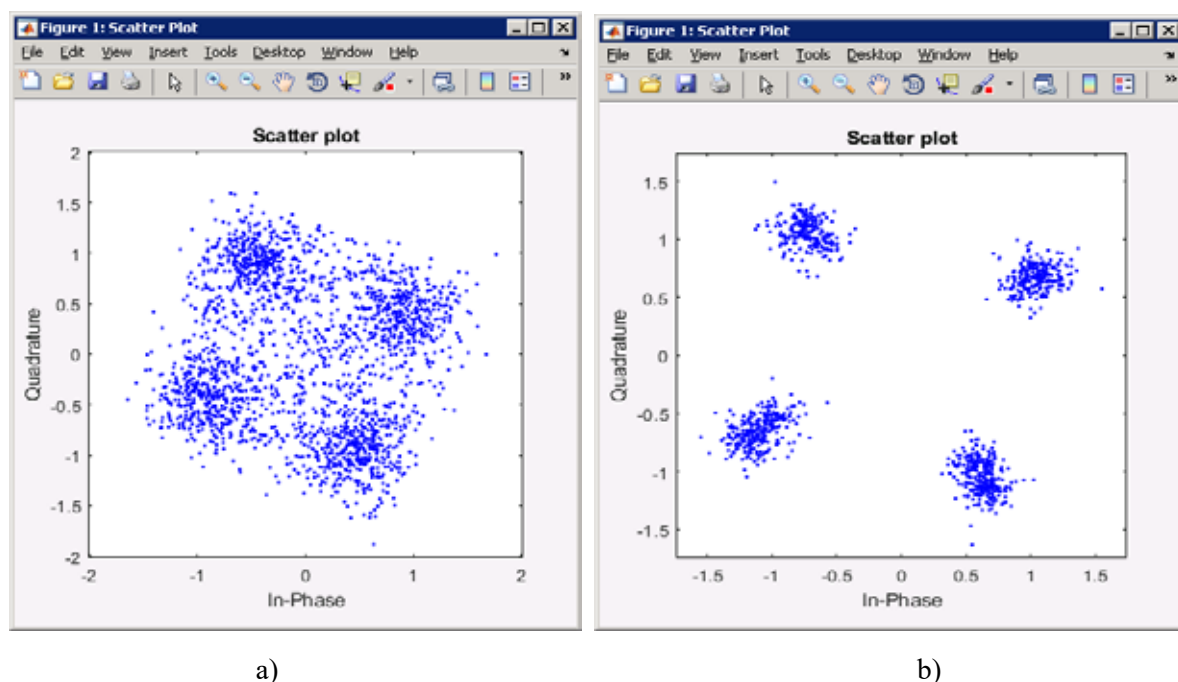


Fig. 6. The signal constellation of one of the packets before phase shift compensation and time synchronization (a), the signal constellation of one of the packets after time synchronization by the Matlab function `comm.SymbolSynchronizer()` (b)

practice to select the best of the 2 available samples per symbol.

The time synchronization function (symbol synchronization) is initialized as follows:

```
% Create symbol synchronizer
symSync = comm.SymbolSynchronizer( ...
    'SamplesPerSymbol', 2, ...
    'DampingFactor', sqrt(2)/2, ...
    'NormalizedLoopBandwidth', 0.02);
```

We use it when there are two samples for each symbol, and the function returns a signal with one sample per symbol. Unfortunately, there are two minor flaws with the function, which are easily fixed, fortunately. The function does not work well on the first call, so you will need to call it first before using its results. Additionally, it gives you an extra first sample, which we will remove. Working with the function is as follows:

```
% Symbol synchronizer:
if prRepead % the result is bad
    PacketOpt0 = symSync(Packet); % on the
first call.
    prRepead=0;
end
PacketOpt1 = symSync(Packet); % removing
the shift
PacketOpt1=PacketOpt1(2:end); % by 1
symbol
```

Here, **Packet** is the complex samples in a packet obtained after determining the boundaries of each packet using the Barker code:

```
Packet=RCRxSignal(Mind(i):Mind(i)+NFFT1-1);
```

The result of the function is clearly visible on the signal constellation (Fig. 6, b). All the symbols are compactly assembled, leaving only a phase shift of about 10 degrees.

To explain the second method, we will present the signal constellation separately for even and odd samples. Since we have two samples per symbol, one of them should be closer to the center of the transmitted symbol, and therefore, more accurately convey information about the symbol. This is clearly visible in the signal constellation of even and odd samples (Fig. 7).

Here, all four symbols are compactly arranged for even samples. The phase shift is slightly larger, if we mean by the phase shift an angle of up to 45 degrees, the rotation of which places the centers of gravity of the groups of symbols along the bisectors of the coordinate quarters. It is clear that this does not guarantee the location of the groups of symbols in their quarters, you may have to rotate the phase by an angle of 90, 180 or 270 degrees. At the same time, odd samples carry practically no information.

It remains for each packet to choose between even and odd samples. In principle, this can be done using

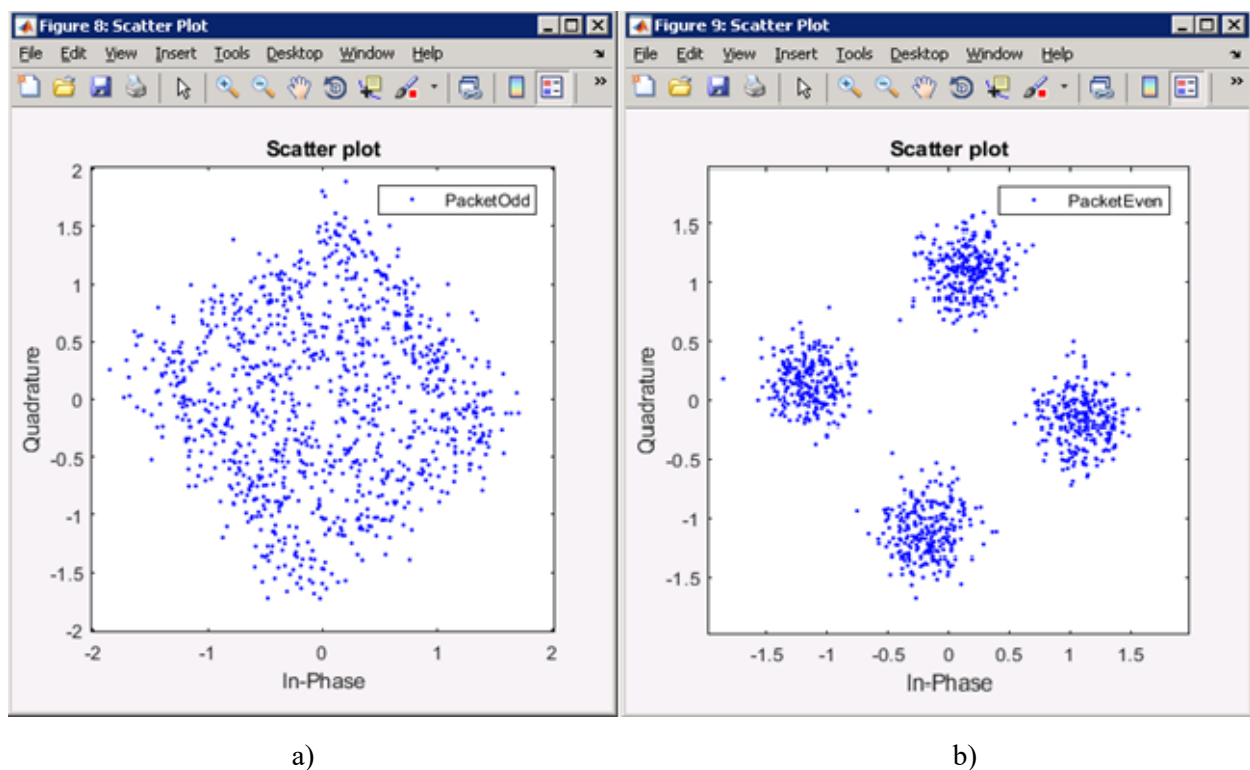


Fig. 7. The signal constellation of one of the packets for odd (a) and even (b) samples

the signal constellation or the unwrapped phase. We believe that the simplest and most reliable approach is to use the magnitude of the signal after removing the phase wrap. Figure 8 shows the magnitude of the 4th degree of the signal for odd and even samples separately for one of the packets. Note that different scales were chosen for even and odd samples in this figure.

To measure the preference for odd or even samples, we can look at the minimality of their variances. In Figure 8, the ratio of odd symbol variance to even sample variance was 3.45 for the magnitudes.

The software implementation of the decision is as follows:

```
% Choosing between even and odd samples:
PacketM=SignalM(Mind(i):Mind(i)+NFFT1-1);
PacketOddM=PacketM(1:2:end);
PacketEvenM=PacketM(2:2:end);
varOdd=var(abs(PacketOddM));
varEven=var(abs(PacketEvenM));
if varOdd <= varEven
    prOdd=1;
else
    prOdd=0;
end
Packet=RCRxSignal(Mind(i):Mind(i)+N
FFT1-1);
if prOdd
```

```
    PacketMopt=PacketOddM;
    PacketOpt=Packet(1:2:end);
    Kvar=varEven/varOdd;
else
    PacketMopt=PacketEvenM;
    PacketOpt=Packet(2:2:end);
    Kvar=varOdd/varEven;
End
```

Phase synchronization. After synchronizing the symbols, we will once again estimate the residual frequency shift for each packet, and for comparison, we will do this both for the spectrum and for the phase:

```
% Calculating frequency shift from spectrum:
dfestSP = FFTFreqSynchr(PacketMopt,
SampleRate)/M;
% Calculating the frequency shift from the
unwrapped phase:
PacketOptM = PacketOpt.^M;
PhaseOpt = phaseCalc(PacketOptM);
dfestPH = PhaseFreqSynchr(PhaseOpt,
SampleRate)/M;
```

The phase rotation angle can be calculated based on the center of gravity of the 4 groups of transmitted symbols. We will use the MATLAB function `comm.CarrierSynchronizer()`, which, in addition to the phase synchronization, performs synchronization based on

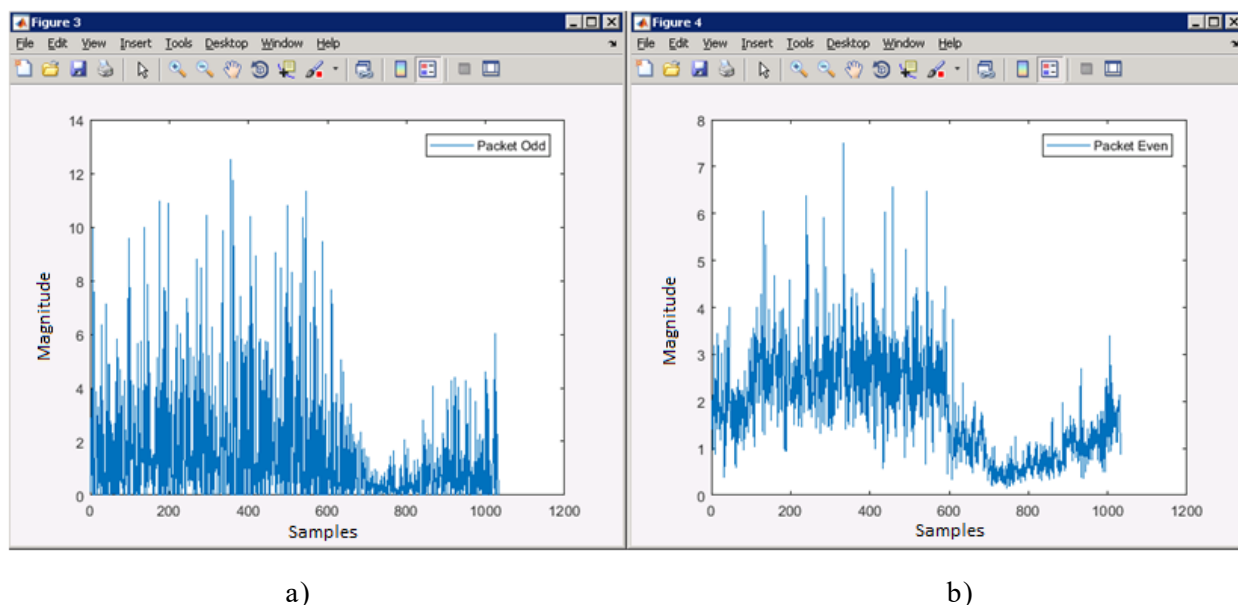


Fig. 8. Magnitude of one of the packets for odd (a) and even (b) samples

the carrier frequency shift. The function descriptor is created as follows:

```
% Create frequency and phase synchronizer
carrSync = comm.CarrierSynchronizer( ...
    'DampingFactor', 0.707, ...
    'NormalizedLoopBandwidth', 0.01, ...
    'SamplesPerSymbol', 1,...
    'Modulation','QPSK',...
    'ModulationPhaseOffset','Auto');
```

To compare the symbol synchronization options, the program implements the ability to process a frame in parallel with both options. Therefore, the use of the `comm.CarrierSynchronizer()` function looks like this:

```
if prOpt
    fineCompPacketOpt =
carrSync(PacketOpt);
    Legend='Odd/Even';
else
    fineCompPacketOpt = carrSync(Packet
Opt1);
    Legend='Symbol Synchronizer';
End
```

Figure 9 shows the packet signal constellations for two implementations. If in the first implementation a slightly better result was obtained using the Matlab function `comm.SymbolSynchronizer()`, then in the second implementation we see that its use led to the scattering of some symbols, which is not observed when using the choice of even/odd samples.

As mentioned above, the results obtained do not guarantee that the phase shift has been completely eliminated. Rotating the phase plane by multiples of 90 degrees would lead to the same qualitative signal constellation. Using only the samples of the signal alone, we would not be able to detect such rotations in any way. This is where the Barker code, which is placed at the beginning of each packet, comes to our aid. To do this, we will need to decode the first 13 bits using additional phase rotations of 0, 90, 180, and 270 degrees, and compare them to the Barker code in use. The rest of the packet will be decoded using a phase rotation that will result in the fewest errors. The function that implements this process looks like this:

```
function [PhSp, mind] =
PhaseByBarker(BarkerIn, Barker)
%% The function of searching for phase
rotation
% by matching the Barker code:
% BarkerIn - received Barker code in QPSK
symbols
% Barker - initial Barker code in QPSK symbols
% PhSp - required phase rotation in radians
% mind - the number of error bits in the
Barker code
% for the selected rotation
M=4; % for QPSK
% Barker code conversion table for
0, pi/2, pi, 3*pi/2 degree
% phase rotation
BarkerSp=[0,1,2,3; 1 3 0 2; 3 2 1 0; 2 0 3 1];
BL=length(BarkerIn); BarkerInSp(1:M,1:BL)=0;
```

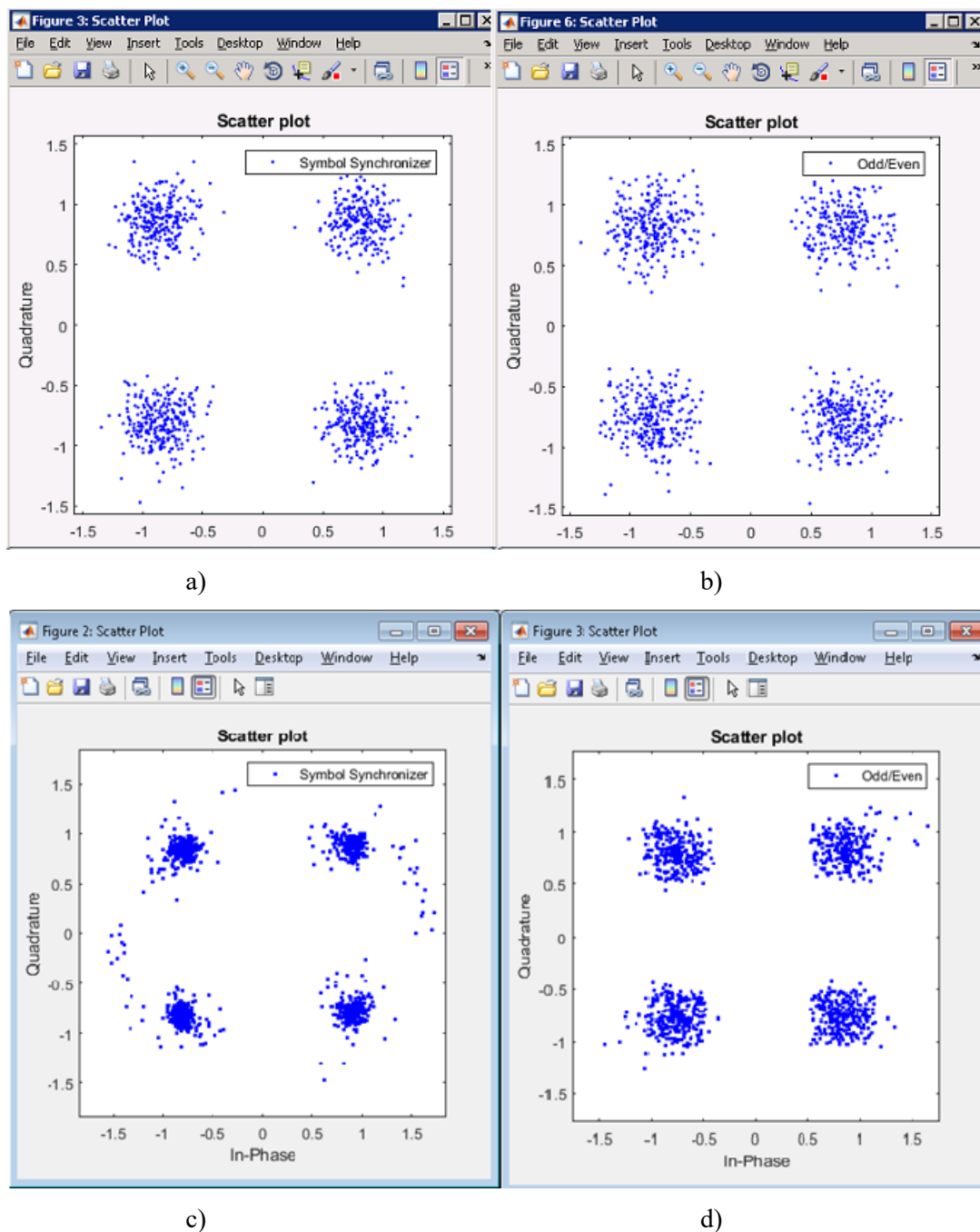


Fig. 9. The signal constellation of the packet after phase synchronization by the `comm.SymbolSynchronizer()` function (c) and the selection of even/odd samples (d); (a), (b) – before synchronization, respectively

```
dSp(1:M)=0;
for i1=1:M
    for j1=1:BL
        BarkerInSp(i1,j1)=BarkerSp(i1,BarkerI
n(j1)+1);
    end
    [dSp(i1,~)] = biterr(BarkerInSp(i1,:),Barker);
end
[mind,indPhSp]=min(dSp); PhSp=(indPhSp-
1)*pi/2;
End
```

Recall that the original Barker bipolar code $[1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1]$ we encode with QPSK symbols 0, 3 and get the following sequence $[0,0,0,0,0,3,3,0,0,3,3,0]$ (0 corresponds to the 1st quarter, 1–2nd quarter, 3–3rd quarter and 2–4th quarter in the Gray encoding that we use). Now we need to create a table of symbol transformations during phase rotations. In the program, it is represented by the `BarkerSp` matrix, the i^{th} row of which corresponds to the rotation of the phase counterclockwise by an angle of $\pi/2 \cdot (i-1)$ radians.

In the function, we count not symbol failures, but bit failures for each rotation.

The function is called in the program after the initial phase synchronization and decoding with the following lines:

```
% Packet Demodulation:
rxInf = pskdemod(fineCompPacketOpt,M,ini_
phase0,symbol_order);
% Searching for phase rotation by matching the
Barker code:
BarkerIn=rxInf(1:BL);
[PhSp, mind] = PhaseByBarker(BarkerIn,Barker);
```

Now we can decode the packets taking into account the phase rotation found:

```
% Demodulation of a packet after phase
rotation:
ini_phase=ini_phase0-PhSp;
rxInf = pskdemod(fineCompPacketOpt,M,ini_
phase,symbol_order);
```

Processing of received information is completed by calculating the BER for each information packet:

```
NN = length(rxInf);
[numErr,BER] = biterr(txInf(1:NN),rxInf);
fprintf('PhSp=%.0f градусов, min_d=%3d\
n',PhSp*180/pi,mind);
fprintf('numErr=%4d,BER=%7.5f\n\
n',numErr,BER);
```

Before finishing the program we need to release the ADALM PLUTO SDR platform and the objects used:

```
% Release the state of sdrTransmitter,
sdrReceiver and objects:
release(sdrTransmitter);
release(sdrReceiver);
release(symSync);
release(carrSync);
```

Analysis of the program operation. To analyze the operation of various blocks, we will run the program twice with the same parameters at close time intervals (Table 1).

The established frequency offset on the receiver of 50 Hz relative to the transmitter was estimated with good accuracy (at the first launch the error was about 0.03 Hz, in the second case – less than 0.01 Hz). This indicates good frequency matching between the receiver and transmitter within the Pluto platform due to the use of a single local oscillator for both the

receiver and transmitter. However, after reducing the sampling frequency to 100 kHz, a small frequency offset is recorded, not exceeding 0.4 Hz. Such a frequency shift with the accepted symbol length and packet duration has practically no effect on the characteristics of information transmission. Moreover, it will be further reduced by the function `comm.CarrierSynchronizer()`, which adjusts the frequency and phase. To verify this, we will additionally measure the frequency shift after the specified function. The results of such a measurement in one of the program launches are given below (`dfestSP` is the shift before re-tuning, `dfestSP1` is after) – Table 2.

The residual offset does not exceed 0.45 Hz.

The algorithm for estimating the frequency shift in the signal phase with large SNR, which were implemented in the above launches, gives approximately the same shifts, however, with a decrease in signal power, as in modeling, it produces unacceptable results (the `dfestPH` parameter) – Table 3.

The energy of the signal during the second launch was approximately 2 dB lower than the first, although the time interval between the two launches was no more than 10 seconds. This could be due to interference or instability on the Adalm Pluto SDR platform. Using the `SymbolSynchronizer()` function and an algorithm to choose between even and odd sample values resulted in completely error-free data transmission. Additionally, odd samples were found to be more effective for the first launch and even samples for the second launch. After the function `comm.CarrierSynchronizer()` it had to rotate the phase by 180 degrees at the first start, and by 270 degrees in the second case, regardless of the algorithm used. This phase shift is the same for all packages within a single launch.

In conclusion, it remains for us to compare the two synchronization algorithms with lower SNRs. The results are shown in Table 4.

As can be seen from the table above, in two starts when the transmitter signal was attenuated to -48 dB, the algorithm for choosing between even and odd samples turned out to be about an order of magnitude worse in terms of BER, however, in the next two starts when attenuating to -50 dB, the SNR dropped significantly (about 9 and 12 dB). At 12 dB, the algorithms equaled the BER level, and at 9 dB using the `SymbolSynchronizer()` function led to the complete destruction of the channel, while the automatic selection of even or odd samples provided an acceptable level of failures that can be eliminated by other methods, in particular, using error correction codes. The data obtained also allows us to conclude that error-

Table 1

Program operation log

First launch	Second launch
Generating QPSK transmit waveform at: Transmitter.SampleRate=400000 Hz Transmitter.CenterFrequency=1850000000 Hz Transmitter.Gain=-45 dB Starting a new RF capture at: Receiver.CenterFrequency=1850000050 Hz Receiver.GainSource=AGC Slow Attack dfestSP0=-49.9704. Number of found packets = 3 prOpt=0. % 0 - Symbol Synchronizer Packet #1,SNR=18.0 dB,prOdd=1,Kvar=3.32. dfestSP=0.3391 PhSp=180 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #2,SNR=18.2 dB,prOdd=1,Kvar=2.97. dfestSP=0.5545 PhSp=180 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #3,SNR=17.8 dB,prOdd=1,Kvar=3.16. dfestSP=0.4120 PhSp=180 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 prOpt=1. % 1 - Odd/Even choice Packet #1,SNR=18.0 dB,prOdd=1,Kvar=3.32. dfestSP=0.3391 PhSp=180 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #2,SNR=18.2 dB,prOdd=1,Kvar=2.97. dfestSP=0.5545 PhSp=180 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #3,SNR=17.8 dB,prOdd=1,Kvar=3.16. dfestSP=0.4120 PhSp=180 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000	Generating QPSK transmit waveform at: Transmitter.SampleRate=400000 Hz Transmitter.CenterFrequency=1850000000 Hz Transmitter.Gain=-45 dB Starting a new RF capture at: Receiver.CenterFrequency=1850000050 Hz Receiver.GainSource=AGC Slow Attack dfestSP0=-49.9924. Number of found packets = 3 prOpt=0. % 0 - Symbol Synchronizer Packet #1,SNR=16.9 dB,prOdd=0,Kvar=2.62. dfestSP=-0.0116 PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #2,SNR=16.2 dB,prOdd=0,Kvar=3.93. dfestSP=0.3297 PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #3,SNR=16.1 dB,prOdd=0,Kvar=2.60. dfestSP=-0.1924 PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 prOpt=1. % 1 - Odd/Even choice Packet #1,SNR=16.9 dB,prOdd=0,Kvar=2.62. dfestSP=-0.0116 PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #2,SNR=16.2 dB,prOdd=0,Kvar=3.93. dfestSP=0.3297 PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #3,SNR=16.1 dB,prOdd=0,Kvar=2.60. dfestSP=-0.1924 PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000

Table 2

Program operation log

prOpt=0. Packet #1,SNR=19.0 dB,prOdd=0,Kvar=4.19. dfestSP=3.9517, dfestSP1=0.0966. PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000 Packet #2,SNR=18.7 dB,prOdd=0,Kvar=5.84. dfestSP=1.8721, dfestSP=0.3524. PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000	Packet #3,SNR=18.7 dB,prOdd=0,Kvar=5.12. dfestSP=1.7735, dfestSP=0.4296. PhSp=270 degrees, min_d= 0 numErr= 0,BER=0.00000

Table 3

Program operation log	
SNR 16 dB	SNR 9 dB
Packet #1, SNR=16.8 dB, prOdd=0, Kvar=3.56. dfestSP=-0.6092, dfestPH=-0.9937. PhSp=180 degrees , min_d= 0 numErr= 0, BER=0.00000	Packet #1, SNR=9.0 dB, prOdd=0, Kvar=1.32. dfestSP=-0.0094, dfestPH=82.6901. PhSp=270 degrees , min_d= 2 numErr= 20, BER=0.00970
Packet #2, SNR=16.6 dB, prOdd=0, Kvar=3.58. dfestSP=0.0151, dfestPH=1.0546. PhSp=180 degrees , min_d= 0 numErr= 0, BER=0.00000	Packet #2, SNR=9.5 dB, prOdd=0, Kvar=1.39. dfestSP=-1.0198, dfestPH=-10.3491. PhSp=270 degrees , min_d= 0 numErr= 20, BER=0.00970
Packet #3, SNR=16.7 dB, prOdd=0, Kvar=3.80. dfestSP=-0.6271, dfestPH=-0.4760. PhSp=180 degrees , min_d= 0 numErr= 8, BER=0.00388	Packet #3, SNR=9.5 dB, prOdd=0, Kvar=1.53. dfestSP=-0.4988, dfestPH=6.4755. PhSp=270 degrees , min_d= 0 numErr= 2, BER=0.00097

Table 4

Results of comparison of synchronization algorithms					
	Number of errors			Number of errors	
SNR (dB)	Symbol Synchronizer	Odd/Even Choice	SNR (dB)	Symbol Synchronizer	Odd/Even Choice
Transmitter.Gain=-48 dB					
17,0	0	0	14,7	0	5
16,9	0	1	15,8	1	1
16,3	0	7	15,6	0	3
Total:	0	8	Total:	1	9
Transmitter.Gain=-50 dB					
9,3	1062	17	12,3	9	11
9,4	1061	7	12,3	6	6
8,2	1058	15	12,5	14	13
Total:	3181	39	Total:	29	30

free information transmission is possible in the considered data transmission channel with a SNR of about 10 dB. Remind that in this case we are talking about the SNR over the entire quantization frequency range, so the SNR measured at the maximum of the amplitude spectrum will be significantly higher.

Conclusions. The use of the ADALM PLUTO SDR hardware and MATLAB software as a laboratory stand allows us to explore all stages of

digital signal processing in the creation of modern software-defined wireless radio systems. This paper demonstrates the creation of a QPSK-modulated data transmission system. Synchronization algorithms for real data transmission systems are presented. This technique can be used in the education of university students in the framework of educational programs in the field of telecommunications.

Bibliography:

1. Introduction to ADALM-PLUTO. URL: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users/intro> (дата звернення 15.07.2025).
2. Hands-on workshop: Software-defined radio. Analog Devices. URL: https://wiki.analog.com/_media/richardsonmathworksseminars.pdf (дата звернення 15.07.2025).
3. ADALM-PLUTO Radio Support from Communications Toolbox. MathWorks. URL: <https://surl.li/rgeryw> (дата звернення 15.07.2025).
4. L. A. Camuñas-Mesa, J. M. De La Rosa. Using Software-Defined Radio Learning Modules for Communication Systems. 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), Teruel, Spain. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/TAEE54169.2022.9840692
5. S. B. S. Hanbali. Low-cost software-defined radio for electrical engineering education. IEEE Potentials. 2023. Vol. 42. №. 5. P. 13–19. DOI: 10.1109/MPOT.2022.3223788

6. M. Rice, M. McLernon. Teaching communications with SDRs: Making it real for students. IEEE Commun. Mag. 2019. Vol. 57. №. 11. P. 14–19. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900185.

7. S. Yogitha and D. Raju. Design And Implementation Of QPSK Modulation System. 2017. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128355114> (дата звернення 15.07.2025).

8. Іхсанов Ш.М., Рябенський В.М., Дьяконов О.С. Дослідження сигналів реальних інформаційних систем з використанням приймачів RTL-SDR: навч. посіб. Миколаїв, 2019. 184 с.

9. W. Stewart, W. Barlee, S. W. Atkinson, H. Crockett. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. 1st Edition. UK: University of Strathclyde, 2015.

Іхсанов Ш.М., Дьяконов О.С. РЕАЛІЗАЦІЯ РЕАЛЬНОГО КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА БАЗІ ОДНІЄЇ ПЛАТФОРМИ ADALM-PLUTO SDR

У роботі аналізуються питання впровадження в навчальний процес апаратних платформ програмно-визначених радіосистем при вивченні циклу дисциплін, пов'язаних з теорією електричного зв'язку і побудовою цифрових бездротових систем.

Очевидно, що використання в навчальних цілях апаратних платформ при вивченні систем бездротового зв'язку має ряд переваг, серед яких – наочна демонстрація роботи радіосистеми, можливість проводити додаткові експерименти, пов'язані з дослідженням поширення радіохвиль, врахування дрейфу характеристик апаратної частини і т. п.

У якості апаратної платформи для лабораторного стенду обраний модуль активного навчання від компанії Analog Devices – ADALM PLUTO SDR.

Зазначено, що для ефективного вивчення принципів цифрової обробки сигналів повинен бути створений скелет програми, що включає в себе частини коду з ініціалізації апаратної платформи, а також мінімальний функціонал блоків цифрової обробки, які використовуються в реальних системах.

На прикладі демо-програм, які поставляються з пакетом MATLAB, показано, що вони потребують суттєвого доопрацювання для реалізації працюючої радіодистеми.

В ході реалізації реальної системи передачі даних з модуляцією QPSK розроблені два варіанти обробки сигналу, спрямовані на усунення порушення часової синхронізації.

Наведено приклад програмної реалізації щодо прийняття рішення в частині визначення додаткового зсуву сигнального сузір'я на кут кратний 90 градусів з використанням кодів Баркера. Даний функціонал використовується після первинної синхронізації і декодування.

Представлені результати роботи розроблених програм, які демонструють прийнятне зведення частот при синхронізації приймача і передавача в рамках однієї апаратної платформи ADALM PLUTO SDR. Помилка оцінки даного зміщення становить 0,01–0,03 Гц. Наведено аналіз роботи алгоритму оцінки зміщення частота по фазі сигналу при різних співвідношеннях сигнал/шум. Також проаналізовано роботу двох алгоритмів синхронізації (алгоритм вибору між парними і непарними відліками і алгоритм символної синхронізації) для декількох рівнів потужності передавача. Отримані дані також дозволяють зробити висновок про можливість безпомилкової передачі інформації в розглянутому каналі передачі даних при відношенні сигнал/перешкода близько 10 дБ.

Ключові слова: ADALM PLUTO SDR, програмно-визначене радіо, QPSK, символна синхронізація, фазова синхронізація, освіта, комунікаційні системи, модуляція.

Дата надходження статті: 13.07.2025

Дата прийняття статті: 20.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Касілов О.В.Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Дмитрук К.С.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В РОЄВІЙ МЕРЕЖІ ДРОНІВ

У статті розглянуто модель динамічного балансування навантаження в роєвій бездротовій мережі на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Запропоновано підхід до побудови маршрутів передавання даних із урахуванням мобільності дронів, поточного навантаження, якості каналу зв'язку та рівня залишкової енергії. Комунікаційна мережа описується у вигляді зваженого графа з динамічними вагами, що дозволяє здійснювати адаптивну маршрутизацію в умовах постійної зміни топології.

Комунікаційна структура представлена у вигляді зваженого графа, де вага кожного ребра динамічно змінюється залежно від параметрів мережі та умов середовища. Це забезпечує адаптивну маршрутизацію, здатну миттєво реагувати на зміни, спричинені переміщенням дронів або зміною умов каналу зв'язку. У роботі запропоновано математичну модель для розрахунку ваги зв'язку між вузлами, яка базується на кількох показниках: рівень навантаження, потужність сигналу, затримка та енергоефективність. На основі цієї моделі сформульовано оптимізаційну задачу, яка передбачає мінімізацію максимального навантаження на окремі вузли мережі, що дозволяє досягти більш рівномірного розподілу трафіку.

Для вибору оптимальних маршрутів застосовано модифікований алгоритм Дейкстри, який динамічно перебудовує шляхи з урахуванням змін у топології мережі. Результати симуляційного моделювання в середовищі NS-3 засвідчили перевагу запропонованого підходу: у порівнянні з фіксованими схемами маршрутизації спостерігається суттєве зменшення втрат пакетів (у 4–10 разів), стабілізація затримок передачі навіть при високій мобільності, а також рівномірний розподіл енергоспоживання між дронами.

Запропонована модель є ефективним інструментом для забезпечення стабільної роботи автономних роєвих мереж у складних умовах, зокрема в пошуково-рятувальних операціях, моніторингу важкодоступних територій, інспекції об'єктів критичної інфраструктури та реалізації сценаріїв автономного мережевого покриття. Модель забезпечує високу адаптивність, децентралізацію управління, стійкість до змін середовища та підвищену ефективність використання обмежених ресурсів у динамічних телекомунікаційних системах нового покоління.

Ключові слова: роєва мережа, безпілотні літальні апарати, динамічне балансування навантаження, адаптивна маршрутизація, залишкова енергія, зважений граф, оптимізація трафіку, алгоритм Дейкстри, симуляційне моделювання, децентралізована комунікаційна система.

Постановка задачі. У сучасних телекомунікаційних системах зростає інтерес до побудови мобільних мереж на основі роєвих систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА), де кожен дрон виконує не лише функції сенсора або виконавця, а й виступає як елемент бездротової мережі з функціями маршрутизації, ретрансляції та агрегації даних. У таких системах важливо забезпечити стабільну якість обслуговування (QoS) за

умов динамічної зміни топології, що зумовлена мобільністю кожного дрона. Особливо критичною є задача балансування навантаження між дронами, які тимчасово виконують роль вузлів комунікаційного ядра мережі.

У роєвих системах безпілотних літальних апаратів (БПЛА), кожен дрон виконує не лише основне завдання (спостереження, доставка тощо), але й функції мережевого вузла – ретрансляції,

маршрутизації або агрегації даних. У динамічному середовищі рою топологія постійно змінюється внаслідок переміщення дронів, що створює ризик нерівномірного розподілу навантаження між ними. Деякі дрони можуть стати вузькими місцями для передачі даних, швидко виснажуючи свої енергетичні ресурси.

Щоб уникнути перевантажень і втрат інформації, необхідно завчасно прогнозувати зміну топології та адаптивно перенаправляти потоки даних, оптимізуючи маршрути відповідно до мобільності та навантаження дронів. Тому, розглянута проблема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останній період опубліковано низку видань, присвячених тематиці оптимізації продуктивності багатошарових бездротових мереж із динамічним розподілом ресурсів. Так [1] надає комплексний аналіз моделей та протоколів для роєвих мереж безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Книга детально розглядає інженерні аспекти, зокрема, проектування мережевих протоколів для динамічних, масштабованих мереж БПЛА. Серед переваг слід відзначити глибоке опрацювання теми та практичну спрямованість матеріалу. Однак, недоліком є обмежена увага до питань динамічного балансування навантаження та розподілу ресурсів у багатошарових мережах.

У [2] представлено архітектуру еластичного планування ресурсів у хмарно-крайових локальних мережах на основі БПЛА. Запропоновано алгоритми для точного прогнозування змін топології мережі та динамічного балансування трафіку. Перевагою є інтеграція сучасних методів машинного навчання для підвищення ефективності мережі. Втім, книга зосереджується переважно на теоретичних аспектах, що може ускладнити її практичне застосування.

Джерело [3] пропонує систематичний огляд досліджень, присвячених розподіленому оффлоадингу завдань у роєвих мережах БПЛА. Розглянуто ключові підходи та виклики, пов'язані з ефективним управлінням обчислювальними та мережевими ресурсами. Перевагою є ґрунтовний аналіз існуючих рішень та виявлення відкритих питань. Однак, відсутність детального розгляду конкретних моделей та методів оптимізації може обмежити практичну цінність для інженерів-практиків.

У [4] досліджується оптимізація маршрутів БПЛА в умовах стихійних лих. Запропоновано систему шляхів, що організовує траєкторії та планування висоти БПЛА, враховуючи послідовність та пріоритетність кластерів. Перевагою є прак-

тична спрямованість та застосовність у реальних умовах надзвичайних ситуацій. Втім, книга не приділяє достатньої уваги питанням балансування навантаження та динамічного розподілу ресурсів у багатошарових мережах.

Джерело [5] аналізує стратегії динамічного розгортання систем виявлення вторгнень (IDS) з використанням балансування навантаження в мережах БПЛА. Розглянуто підходи до адаптивного розміщення IDS для підвищення ефективності виявлення загроз. Перевагою є новизна підходу та його потенційна ефективність у динамічних середовищах. Однак, книга зосереджена на питаннях безпеки, що може обмежити її корисність для дослідників, зацікавлених у загальних аспектах оптимізації продуктивності мереж.

У [6] розглядається проблема проектування траєкторій для роєвих БПЛА в мережах Інтернету речей (IoT). Запропоновано методи оптимізації маршрутів з урахуванням динамічних змін у мережі. Перевагою є інтеграція IoT та БПЛА для підвищення ефективності збору даних. Втім, книга не приділяє достатньої уваги питанням балансування навантаження та управління ресурсами в багатошарових мережах.

Джерело [7] пропонує оптимізаційний підхід до балансування навантаження в динамічних мережах ретрансляторів на основі БПЛА. Розглянуто методи підвищення пропускну здатності та справедливого розподілу ресурсів серед користувачів. Перевагою є застосування сучасних алгоритмів оптимізації для вирішення актуальних проблем мереж БПЛА. Однак, книга може бути складною для сприйняття без глибоких знань у галузі оптимізаційних методів.

У [8] представлено автоматизовану розподілену систему управління для самооптимізуючихся мереж дронів. Запропоновано підходи до динамічного налаштування мережевих параметрів з метою підвищення продуктивності. Перевагою є можливість адаптації мережі до змінних умов без втручання оператора. Втім, книга зосереджується на загальних принципах управління, не надаючи детальних алгоритмічних рішень для конкретних сценаріїв.

Джерело [9] досліджує використання метанавчання для проектування траєкторій у бездротових мережах БПЛА. Розглянуто підходи до швидкої адаптації траєкторій дронів у нових умовах на основі попереднього досвіду.

Постановка завдання. Для вирішення цієї задачі у межах роботи запропоновано адаптацію моделі динамічного балансування наван-

таження, яка може бути сформульована і для загальних багатошарових бездротових мереж. Особливістю її застосування до роєвих мереж є включення до моделі додаткових параметрів – таких як траєкторії польоту дронів, ймовірності ретрансляції даних через окремі вузли, а також обмеження на енергетичні ресурси кожного пристрою.

Модель включає блок прогнозування мобільності дронів, що реалізується за допомогою спрощених фільтрів Калмана. Цей блок дозволяє завчасно визначати, які дрони потенційно стануть центрами комунікаційної активності, виходячи з прогнозованих координат та напрямків руху. На основі цих прогнозів виконується обчислення очікуваного навантаження на кожного дрона, що береться до уваги при плануванні маршруту передачі даних.

Очікуване навантаження обчислюється як сума поточного навантаження та прогнозованого додаткового трафіку, який, з певною ймовірністю, буде передано через даний вузол.

Після оцінки навантаження формулюється задача оптимального розподілу трафіку з метою мінімізації максимального навантаження на мережу дронів. При цьому враховуються обмеження на пропускну здатність каналів зв'язку, допустимі рівні затримки передачі, втрат пакетів та енергетичні обмеження.

Мережа описується як динамічний зважений граф, у якому вага кожного ребра залежить від кількох факторів: поточного навантаження вузла, залишку енергії на борту дрона, параметрів каналу зв'язку (SNR, BER). На основі цих ваг оптимальні маршрути передачі визначаються за допомогою модифікованого алгоритму Дейкстри.

Застосування запропонованої моделі в роєвих мережах дронів дозволяє суттєво підвищити ефективність мережевої взаємодії, знизити затримки, уникати перевантажень окремих вузлів та забезпечувати більш рівномірне енергоспоживання серед дронів. Це особливо актуально в таких застосуваннях, як спільна повітряна розвідка, пошуково-рятувальні місії, моніторинг критичної інфраструктури та інспекція важкодоступних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Сформулюємо модель динамічного балансування навантаження в багатошаровій бездротовій мережі, яка враховує мобільність вузлів та змінність трафіку в часі. Модель покликана прогнозувати переміщення вузлів, оцінювати очікуване навантаження на кожен елемент мережі та адаптивно перенаправ-

ляти трафік таким чином, щоб мінімізувати ризик перевантаження й забезпечити стабільні параметри якості обслуговування (QoS) навіть у динамічному середовищі.

Прогноз траєкторії руху мобільного вузла.

Першим етапом у моделі є прогнозування майбутньої позиції мобільного вузла. Для цього використовується спрощена версія фільтра Калмана – математичної моделі, яка дозволяє оцінювати змінні системи у часі з урахуванням шуму та неточностей у вимірюваннях. Мобільний вузол описується вектором стану, який включає в себе координати положення (x, y, z) та швидкість (v_x, v_y, v_z) . Зміна цього стану в часі моделюється рівнянням:

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + w_t, \quad (1)$$

де x_t – поточний стан вузла, A – матриця переходу, яка задає, як змінюється положення за інерцією, u_t – вектор керування (наприклад, напрямки руху), B – коефіцієнт впливу керування, а w_t – шум моделі, що враховує випадковість у русі. Таким чином, ми отримуємо прогнозовану позицію мобільного вузла на наступний момент часу:

$$\hat{x}_{t+1} = A\hat{x}_t + Bu_t. \quad (2)$$

Це дозволяє завчасно визначити, до якого стаціонарного вузла може приєднатися мобільний пристрій.

Оцінка майбутнього навантаження на мережеві вузли.

Кожен дрон у роєвій мережі, що виконує функції ретрансляції даних, має певний рівень поточного навантаження, який позначається через r_i . Це навантаження визначається кількістю пакетів, що проходять через дрон i за одиницю часу, або обсягом трафіку, який він обробляє у даний момент. Проте у динамічному середовищі рою ситуація може змінитися практично миттєво – сусідні дрони переміщуються, втрачають зв'язок із іншими вузлами або змінюють свій маршрут, що призводить до того, що дрон i може почати обслуговувати більше сусідів, ніж раніше.

Щоб мережа могла заздалегідь підготуватись до можливого перевантаження вузлів, необхідно оцінювати очікуване (прогнозоване) навантаження на кожного з них. Це навантаження позначається як $r_{i,exp}$ і складається з двох частин: поточного навантаження та додаткового прогнозованого навантаження від сусідніх дронів, які можуть звертатися до дрона i як до ретранслятора.

Очікуване навантаження обчислюється за такою формулою:

$$\rho_{i,exp} = \rho_i + \sum_k p_{ik} \cdot \lambda_k, \quad (3)$$

де ρ_i – поточне навантаження на дроні i , яке відоме з його поточного стану; p_{ik} – ймовірність, що дрон k звернеться до i як до ретранслятора. Цей коефіцієнт може визначатися на основі відстані, сили сигналу, історії взаємодії, або ж на основі евристики найближчого сусіда з найкращими умовами зв'язку; λ_k – очікувана інтенсивність трафіку від мобільного вузла k .

Таким чином, сума $\sum_k p_{ik} \cdot \lambda_k$ відображає ймовірний обсяг трафіку, який надійде на дрон i у найближчому майбутньому внаслідок динаміки рою. Цей підхід дозволяє проактивно змінювати маршрути передачі ще до моменту перевантаження вузла – на відміну від реактивних протоколів, що реагують постфактум. Такий тип прогнозування є критично важливим у швидкоплинних сценаріях, зокрема – в управлінні мобільними роями дронів у реальному часі.

Формування критерію оптимального балансування.

Після того, як було оцінено очікуване навантаження на кожен дрон у роєвій мережі, тобто значення $\rho_{i,exp}$, постає задача визначення, як слід перерозподілити потоки даних, аби уникнути перевантаження окремих вузлів. Головна мета такої оптимізації – досягти рівномірного розподілу трафіку, при цьому не перевищуючи технічних та експлуатаційних обмежень системи.

У математичній формі задача формулюється як мінімізація максимального навантаження серед усіх дронів-ретрансляторів. Це дозволяє уникнути так званих «вузьких місць» (bottlenecks), коли один або кілька вузлів значно перевантажені порівняно з іншими:

$$\min \left(\max_i (\rho_{i,exp}) \right). \quad (4)$$

Тобто необхідно знайти такий спосіб перенаправлення трафіку, який зробить найбільш завантажений вузол – якомога менш завантаженим. Щоб зробити цю модель придатною до реального застосування, до задачі додаються обмеження. Наприклад, не можна перевищити пропускну здатність вузла C_i , а також потрібно дотримуватись граничних значень параметрів якості обслуговування: затримки передачі D_i та ймовірності втрати пакетів P_i . Це оформлюється у вигляді задачі лінійного програмування:

$$\min_f \max_i \left(\sum_j f_{ij} \right), \quad (5)$$

за певних умов.

Кожен дрон має обмеження на обсяг трафіку, який він здатен обробити або передати за одиницю часу. Цей параметр позначається як C_i , – пропускна здатність каналу зв'язку дрона i . Всі вхідні та вихідні потоки, що проходять через дрон, не повинні перевищувати це значення:

$$\sum_j f_{ij} \leq C_i, \quad \forall i, \quad (6)$$

де f_{ij} – трафік від вузла j до i , а всі функції залежать від вибору маршрутів.

У роєвих системах дуже важливо зберігати прийнятні значення затримки передачі та втрат пакетів. Наприклад, у випадку відеоспостереження або передачі критичних команд, навіть короточасні затримки можуть спричинити збої. Тому для кожного дрона встановлюються обмеження:

$$D_i(f) \leq D_{max}, \quad \forall i, \quad (7)$$

$$P_i(f) \leq P_{max}, \quad \forall i. \quad (8)$$

Ці значення можуть бути задані системно або адаптивно змінюватися залежно від типу передаваних даних (напр., сенсорні дані можуть бути менш чутливими до затримки, ніж відео).

Оскільки дрони є автономними пристроями з обмеженим джерелом живлення, у моделі також враховується залишок їхньої енергії. Дрон, який працює як вузол ретрансляції, споживає більше енергії, ніж дрон, який лише спостерігає або рухається. Тому в модель включається обмеження:

$$E_i(f) \geq E_{min}, \quad \forall i, \quad (9)$$

де E_i – поточний рівень енергії дрона i , а E_{min} – мінімальний допустимий рівень, необхідний для виконання базових функцій (рух, навігація, аварійна посадка тощо). Це обмеження дозволяє уникнути ситуацій, коли окремі дрони розряджаються через надмірне комутаційне навантаження.

Ця задача належить до класу задач мінімаксної оптимізації з обмеженнями і може розв'язуватись чисельними методами (лінійне програмування, еволюційні алгоритми, жадібні евристики або методи глибокого навчання).

Адаптивне перенаправлення потоків даних.

У запропонованій системі динамічного балансування навантаження в роєвих бездротових мережах, побудованих на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), маршрути передавання даних формуються на основі адаптивного графового

представлення поточного стану мережі. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективну маршрутизацію в умовах високої мобільності вузлів, швидкої зміни топології та нестабільної якості каналів зв'язку.

Мережа дронів моделюється як зважений неорієнтований граф $G = (V, E)$, де кожна вершина V відповідає окремому дрону, а кожне ребро E представляє можливість передавання даних між двома дронами. Ребра включаються до графа лише в тому випадку, якщо між відповідними дронами існує стабільне з'єднання з допустимими параметрами зв'язку (наприклад, за рівнем сигналу або затримкою).

Ключовим елементом цього графового представлення є система вагування ребер. Вага ребра w_{ij} , що відповідає зв'язку між дронами i та j , визначається не лише за фізичною відстанню або кількістю стрибків, як у класичних маршрутизаторах, а як функція поточного стану дрона i (ретранслятора). Зокрема, при формуванні ваги враховуються такі параметри:

- поточне завантаження дрона ρ_i , що характеризує обсяг вхідного і вихідного трафіку через цей вузол у даний момент часу. Високе значення ρ_i свідчить про перевантаження вузла, тому його слід уникати при побудові маршруту;

- якість каналу зв'язку між вузлами i та j , яка може оцінюватися за показниками співвідношення сигнал/шум (SNR) або ймовірністю помилки біта (BER). Кращі параметри зв'язку знижують вагу ребра, оскільки передача буде надійнішою і швидшою;

- залишок енергії дрона E_i , що відіграє особливо важливу роль у випадках, коли дрони виконують багато функцій паралельно (навігація, відеозйомка, обробка даних тощо). Дрон із критичним рівнем заряду повинен бути виведений із маршрутизації, щоб запобігти втраті зв'язку через його вимкнення.

З урахуванням цих параметрів вага ребра w_{ij} може бути визначена за формулою:

$$w_{ij} = \frac{1}{(C_i - \rho_i) \cdot SNR_{ij} \cdot E_i}, \quad (10)$$

де C_i – пропускна здатність радіомодуля дрона i , а всі інші змінні – як описано вище. Чисельник дорівнює одиниці, оскільки модель побудована на принципі оберненої ваги: що кращі умови – то менша вартість ребра. У результаті формування маршруту буде прагнути мінімізувати сумарну вартість, а отже – вибирати маршрути через менш завантажені, енергоефективні та якісні вузли.

Побудова оптимального маршруту для передавання даних виконується на основі алгоритму Дейкстри, який у цій роботі модифіковано для динамічного середовища. Зокрема, перед запуском кожного кроку маршрутизації граф оновлюється з урахуванням актуальних значень навантаження, енергії та якості каналів. Такий підхід дозволяє оперативно реагувати на зміни у структурі мережі, уникати перевантажених або «втомлених» дронів та забезпечувати стабільну якість сервісу в умовах мобільного роєвого середовища.

Таким чином, розглянутий механізм реконфігурації маршрутів забезпечує гнучке, адаптивне та енергоефективне передавання даних у багатокomпонентній мобільній мережі, що формує основу для стабільної комунікаційної взаємодії між дронами у реальних умовах експлуатації.

Практичне застосування моделі: пошуково-рятувальна операція у гірській місцевості.

Для практичної перевірки ефективності моделі динамічного балансування навантаження в мобільній роєвій мережі було змодельовано сценарій пошуково-рятувальної операції після землетрусу у важкодоступному гірському районі. Унаслідок пошкодження інфраструктури традиційні засоби зв'язку стали недоступними, що зумовило необхідність використання автономного рою дронів для спостереження, виявлення потерпілих та передачі відео- і координатної інформації до мобільного наземного штабу.

У симуляції використано рій із 12 дронів, що включали 4 дрони-розвідники з камерами та тепловізорами, 6 дронів-ретрансляторів та 2 дрони-координатори, які утворюють мережеве ядро. Зв'язок реалізовано у вигляді багатошарової ad hoc-мережі із змінною топологією. Для моделювання використано інструментарій NS-3 із модулем *mobility + energy model*, а також кастомізований модуль маршрутизації на основі модифікованого алгоритму Дейкстри з вагами каналів, розрахованими згідно з формулою (10).

Схема роєвої мережі дронів (рис. 1) – показує розташування дронів-розвідників, ретрансляторів і наземного штабу, а також зв'язки між ними.

Початкові параметри симуляції були встановлені таким чином: дрони мали ємність акумулятора 6000 мА·год, час польоту – до 25 хвилин при середньому навантаженні, початкове навантаження ρ_i становило 10–20%, а початкове значення SNR_{ij} – у межах 25–40 дБ. Пропускна здатність каналів змінювалася в діапазоні 5–20 Мбіт/с залежно від відстані та умов оточення.



Рис. 1. Схема роєвої мережі дронів з ретрансляторами

У ході симуляції дрон-розвідник виявив термічну аномалію (ймовірна людина під завалом), після чого почав передавати відеопотік із частотою 30 кадрів на секунду (розмір кадру – 500 КБ) у штаб через два проміжні дрони. Протягом перших 30 секунд маршрут залишався стабільним, однак після переміщення одного з дронів-ретрансляторів на відстань понад 50 метрів якість каналу різко погіршилася (зниження SNR з 35 до 18 дБ), а залишок енергії дрона впав до 22%. Паралельно навантаження ρ_i на ньому сягнуло 75%.

Згідно з логікою моделі, значення ваги ребра w_{ij} через цей дрон зросло з початкового значення 0.003 до 0.042 (умовні одиниці). Система автоматично перерахувала маршрутизацію, і дані почали передаватися через альтернативний дрон із вищим рівнем енергії (56%), нижчим навантаженням (32%) та стабільним каналом (SNR = 38 дБ). Нова вага ребра – 0.005, що свідчить про його пріоритетність у новій топології.

Графік втрат пакетів (рис. 2) – порівнює фіксовану маршрутизацію та запропоновану модель динамічного балансування (наочно видно перевагу моделі).

Результати симуляції продемонстрували, що у випадку використання фіксованої маршрутизації без динамічного балансування втрати кадрів зростали в 4 рази після 60 секунд передачі. У той же час у моделі з динамічною реконфігурацією

маршруту втрати не перевищили 3% навіть при зміні топології. Середня затримка передачі зросла лише на 60 мс, що залишається в межах допуску для реального часу. Середнє енергоспоживання дронів-ретрансляторів також стало більш збалансованим: стандартне відхилення енергоспоживання знизилось із 21% до 9%.

Графік (рис. 3) демонструє зміну середньої затримки передачі даних у часі. Як видно, при використанні динамічної маршрутизації затримка залишається стабільною, тоді як у фіксованій системі вона зростає через перевантаження та деградацію зв'язку.

Діаграма залишку енергії (рис. 4) – демонструє рівномірніший розподіл енергоспоживання при використанні моделі.

Таким чином, експериментально підтверджено ефективність розробленої моделі динамічного балансування навантаження в умовах високої мобільності та обмежених ресурсів. Вона дозволяє уникати перевантаження окремих дронів, забезпечує стабільну якість обслуговування в мережі та сприяє рівномірному енергоспоживанню у роєвій інфраструктурі.

Висновки. Результати моделювання демонструють суттєву перевагу розробленої моделі динамічного балансування навантаження в роєвій бездротовій мережі над традиційними підходами з фіксованою маршрутизацією. Зокрема, викорис-

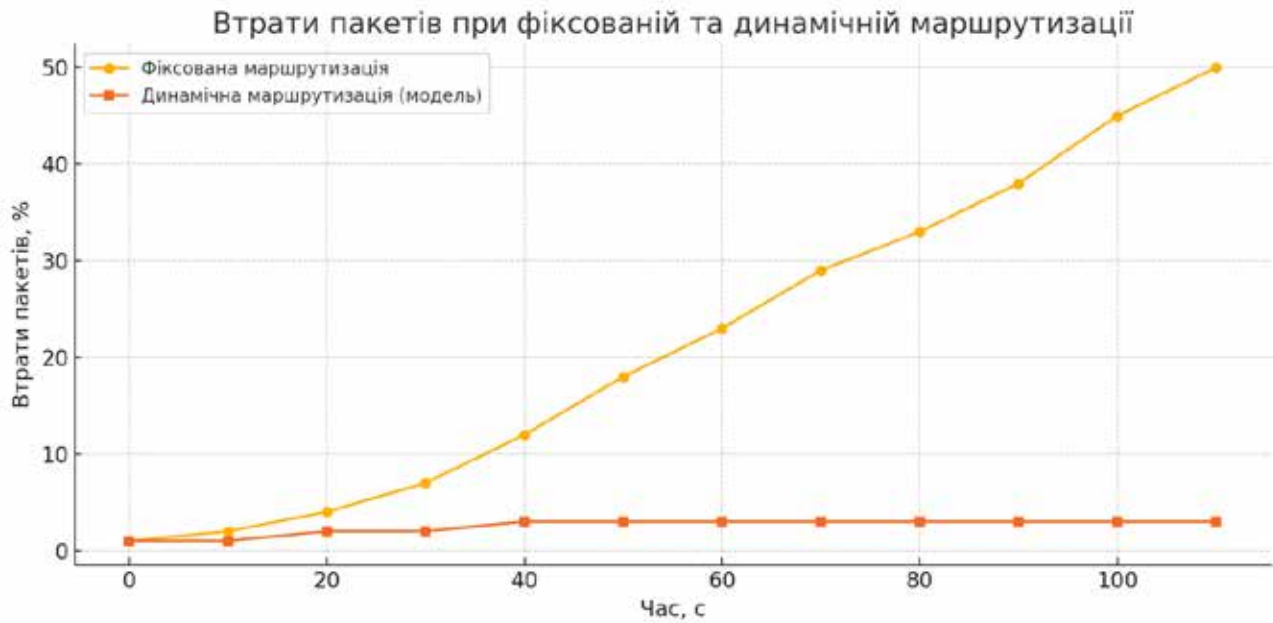


Рис. 2. Втррати пакетів при фіксованій та динамічній маршрутизації

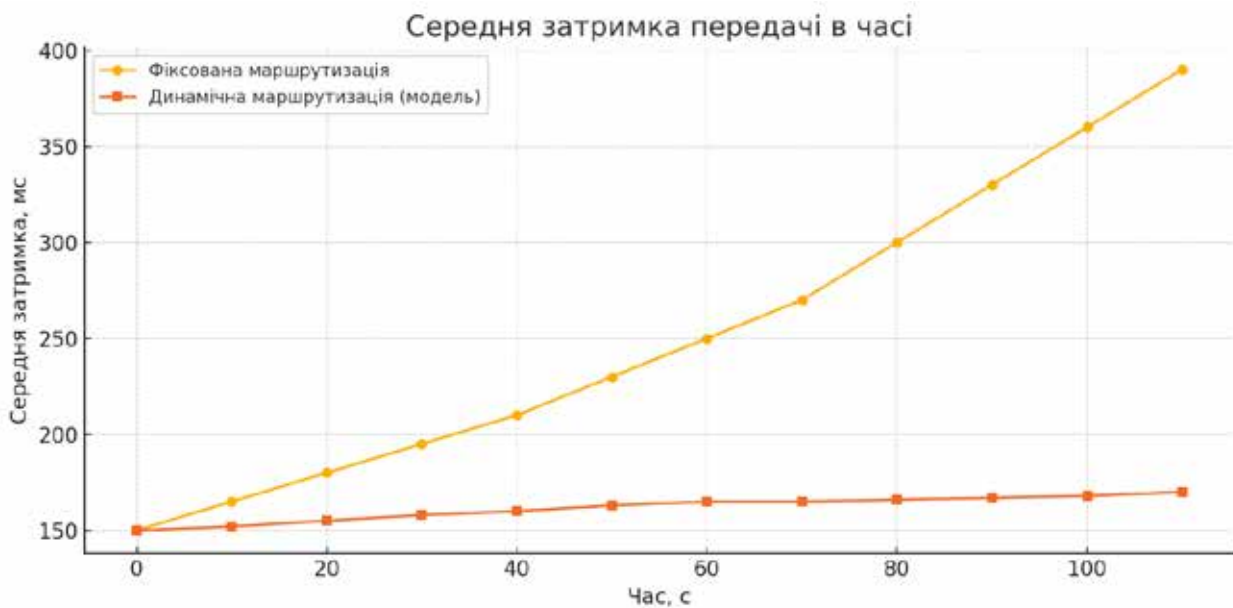


Рис. 3. Середня затримка передачі в часі

тання прогнозування навантаження, якості зв'язку та залишку енергії дало змогу не лише уникати перевантаження окремих вузлів, але й забезпечити стабільність передачі даних у динамічному середовищі. Зменшення кількості втрат пакетів майже в 10 разів є наочним свідченням ефективності адаптивного підходу до керування трафіком у мережі.

Аналіз графіків затримки підтвердив, що динамічна маршрутизація забезпечує значно стабільніший рівень обслуговування. У той час як у системі з фіксованими маршрутами затримка зростала

пропорційно до погіршення каналів зв'язку й зменшення енергії вузлів, динамічна модель дозволяла утримувати цей параметр у допустимих межах завдяки своєчасній реконфігурації маршрутів. Це критично важливо для сценаріїв реального часу, таких як відеоспостереження або оперативна передача координат об'єктів.

Ще одним важливим результатом є рівномірніший розподіл енергоспоживання між дронами. У моделі з балансуванням навантаження система уникала надмірної експлуатації окремих вузлів, що в умовах обмеженого заряду акумуляторів



Рис. 4. Баланс енергоспоживання дронів

продовжувало загальний час місії й зменшувало ризик відмови вузлів через розряд. Це особливо важливо для розширення життєвого циклу автономної системи, коли її використання відбувається у віддалених або важкодоступних місцях.

Загалом, результати симуляції підтверджують практичну доцільність впровадження розробленої моделі в системах типу swarm UAV. Вона дозво-

ляє системі самостійно адаптуватися до зовнішніх і внутрішніх змін без необхідності централізованого втручання, демонструючи ознаки когнітивної поведінки мережі. Таким чином, запропонований підхід може бути успішно застосований не лише у пошуково-рятувальних операціях, а й у військових, логістичних, інспекційних та розвідувальних завданнях.

Список літератури:

1. Asrar A., Baktayan, Ammar T., Zahary, Axel, Sikora, Dominik, Welte. Computational offloading into UAV swarm networks: a systematic literature review. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2024. Vol. 2024, № 1. P. 1–69. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-024-02401-4>
2. Hu Y., Chen M., Saad W., Poor H. V., Cui S. Meta Reinforcement Learning for Trajectory Design in Wireless UAV Networks. Proceedings of IEEE GLOBECOM 2020 – Global Communications Conference. 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322414>
3. Wen C., Chen G., Gu X. et al. Joint optimization of communication rates for multi-UAV relay systems. Complex & Intelligent Systems. 2025. Vol. 11. P. 289. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-025-01910-z>
4. Li D., Du B., Bai Z. Deep Reinforcement Learning Enabled Trajectory and Bandwidth Allocation Optimization for UAV Assisted Integrated Sensing and Covert Communication. Drones. 2025. Vol. 9, № 3. P. 160. DOI: [10.3390/drones9030160](https://doi.org/10.3390/drones9030160)
5. Pan W., Lv N. Multi UAV relay connectivity optimization for heterogeneous users based on load balancing and throughput maximization. IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268206>
6. Joshi P., Kalita A., Gurusamy M. Reliable and efficient data collection in UAV based IoT networks. IEEE Internet of Things Journal. 2023. Vol. 10, № 12. P. 13545–13559. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.05303>
7. Ma M., Wang Z. Distributed offloading for multi-UAV swarms in MEC-assisted 5G heterogeneous networks. Drones. 2023. Vol. 7, № 4. P. 226. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7040226>
8. Suganya B., Gopi R., Ranjith Kumar A., Singh G. Dynamic task offloading edge aware optimization framework for enhanced UAV operations. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. P. 16383. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67285-2>
9. Wen H. Bi et al. Task offloading and data compression collaboration optimization in UAV swarm enabled MEC. Drones. 2024. Vol. 9, № 4. P. 288–305. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9040288>

**Kasilov O.V., Dmytruk K.S. MODEL OF DYNAMIC LOAD BALANCING
IN A SWARM NETWORK OF DRONES**

The article considers a model of dynamic load balancing in a swarm wireless network based on unmanned aerial vehicles (UAVs). An approach to building data transmission routes is proposed, taking into account the mobility of drones, current load, quality of the communication channel and the level of residual energy. The communication network is described as a weighted graph with dynamic weights, which allows for adaptive routing in conditions of constant topology change.

The communication structure is presented as a weighted graph, where the weight of each edge dynamically changes depending on the network parameters and environmental conditions. This provides adaptive routing, capable of instantly responding to changes caused by the movement of drones or changes in the conditions of the communication channel. The paper proposes a mathematical model for calculating the weight of communication between nodes, which is based on several indicators: load level, signal strength, delay and energy efficiency. Based on this model, an optimization problem is formulated that involves minimizing the maximum load on individual network nodes, which allows for a more even distribution of traffic.

To select optimal routes, a modified Dijkstra algorithm is used, which dynamically rebuilds paths taking into account changes in the network topology. The results of simulation modeling in the NS-3 environment have demonstrated the advantage of the proposed approach: compared to fixed routing schemes, there is a significant reduction in packet loss (by 4–10 times), stabilization of transmission delays even with high mobility, as well as uniform distribution of energy consumption between drones.

The proposed model is an effective tool for ensuring stable operation of autonomous swarm networks in difficult conditions, in particular in search and rescue operations, monitoring of hard-to-reach areas, inspection of critical infrastructure facilities and implementation of autonomous network coverage scenarios. The model provides high adaptability, decentralization of management, resistance to environmental changes and increased efficiency of using limited resources in dynamic telecommunication systems of the new generation.

Key words: *swarm network, unmanned aerial vehicles, dynamic load balancing, adaptive routing, residual energy, weighted graph, traffic optimization, Dijkstra's algorithm, simulation modeling, decentralized communication system.*

Дата надходження статті: 17.06.2025

Дата прийняття статті: 24.06.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Катін П.Ю.

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

Вишневий С.В.

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

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СКЛАДОВОЇ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА БАЗІ ПАТЕРНУ «СПОСТЕРІГАЧ»

У статті досліджено архітектуру програмної складової радіотехнічних систем, що дозволяють поєднати різні технології програмування у різних компонентах. Основою апаратної архітектури радіотехнічної системи є головний контролер на основі мікрокомп'ютера з повноцінною ОС або аналогічна потужна мікропроцесорна обчислювальна система з елементами штучного інтелекту. Вона керує іншими складовими радіотехнічної системи, що реалізовані на більш простих мікроконтролерах і відграють роль програмно-апаратних інтерфейсів між головним контролером та датчиками (виконавчими механізмами, радіомодулями, тощо).

У ході дослідження розглянуті різні варіанти архітектур і типових патернів, що можуть бути придатними для вирішення завдання побудови архітектури. У результаті дослідження визначено, що для побудови архітектури доцільно використовувати типовий патерн «Спостерігач». При цьому потрібна модифікація даного патерну з урахуванням вимог поєднання різних програмних технологій.

Визначено, що модифікація «Спостерігач» має бути реалізована за рахунок додавання нових програмних елементів. Він додатково включає програмні складові для розподілу завдання між головним контролером радіотехнічної системи з елементами штучного інтелекту і другою частиною на базі простих мікроконтролерів. Друга частина забезпечує роботу виконавчих механізмів і датчиків з використанням простого мікроконтролера з програмою на основі патерну «Стан».

На відміну від відомих рішень патерну «Спостерігач», отримана архітектура дає можливість поєднати відносно прості модулі на базі мікроконтролерів і складні рішення на основі мікрокомп'ютерів з використанням технологій повноцінної операційної системи.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення програмної складової радіотехнічних, радіокерованих та інших вбудованих систем на основі штучного інтелекту різного рівня складності та призначення.

Ключові слова: системи радіокерування, програмна архітектура, об'єктноорієнтована парадигма програмування, процедурна парадигма програмування, штучний інтелект, архітектура ARM Cortex-M, робототехнічні системи, патерн спостерігач, радіотехнічна система, операційна система реального часу.

Постановка завдання і обмеження. На теперішній час одним із актуальних напрямків дослідження є розробка програмної архітектури радіотехнічних систем (РТС), що можуть потенційно працювати з елементами штучного інтелекту (ШІ). До радіотехнічних систем можна віднести: системи радіокерування, сучасні радіолокаційні станції, радіокеровані повітряні і наземні платформи [1], робототехнічні системи, що працю-

ють на основі радіоканалу, тощо. З'явилися нові роботи у цьому напрямку, наприклад вбудовані системи з елементами радіокерування і елементами ШІ [1–4].

Частина складних РТС може бути представлена у вигляді сукупності програмованих радіотехнічних модулів (ПРМ). Причому базовим контролером радіотехнічної системи (БКРТС) є рішення на основі відносно потужного мікрокомп'ютера,

що реалізує основну логіку радіокерованих систем (РКС) та інших РТС. Допоміжними модулями в цій системі є програмно-апаратні модулі на базі мікроконтролера (МК). В РКС, наприклад, вони забезпечують роботу радіоканалу і виконавчих механізмів. Початковий підхід до узагальнення архітектури, без радіоканалу, показаний у [5]. Програмовані модулі об'єднуються у загальну програмно-апаратну систему із певною програмною архітектурою. Основою архітектури є потужний мінікомп'ютер, якій і являє собою БКРТС, технології програмування якого можуть відрізнятися від технологій ПРМ. Таким чином важливим завданням є розробка програмної архітектури, бажано у рамках відомого шаблону (патерну), що дозволяє забезпечити взаємодію БКРТС з елементами штучного інтелекту і ПРМ на основі відносно простих МК.

Відомо багато практичних варіантів реалізації взаємодії у рамках РКС і радіотехнічних систем. Тому, не змінюючи загального характеру досліджень, **введемо обмеження** на програмну і апаратну складову РТС з елементами ШІ, що містить програмовані модулі і БКРТС.

Апаратна архітектура РТС складається із одного БКРТС, що побудований на базі мікрокомп'ютера (або іншого потужного обчислювального рішення) і працює під управлінням повноцінної операційної системи (ОС). Виконавчі механізми, датчики, радіопередавачі та радіоприймачі підключені до БКРТС за допомогою МК через послідовні інтерфейси (I²C, SPI, USART, тощо) або через порти вводу-виводу загального призначення (ПВВЗП). Фактично ці підсистеми і є ПРМ в рамках загальної архітектури. Апаратною основою таких ПРМ у більшості випадків на теперішній час є МК архітектури ARM Cortex-M.

Таким чином виникає потреба розробити програмну архітектуру РТС з програмованими модулями та БКРТС з елементами ШІ. Виконавчі механізми та датчики працюють через ПРМ у рамках модифікованого патерну «Стан» з можливістю додавання нових станів під час роботи РТС без її зупинки. Операційні системи реального часу (ОСРЧ (RTOS)) не використовуються. Програмні технології БКРТС та ПРМ відрізняються і можуть працювати у різних парадигмах програмування: наприклад у ООП парадигмі (для БКРТС з доступом до всіх технологій повноцінних ОС); для рішень на основі МК (для ПРМ з обмеженим використанням технологій, без ОС).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Показав, що роботи у цьому напрямку прова-

дяться. Наприклад у роботах [1–4] наведений загальний опис вбудованих систем, що містять елементи ШІ і можуть стати основою для побудови загальної архітектури, в той же час загальна архітектура для конкретних рішень РТС в цих роботах не розкрита.

У [5] показана спроба узагальнити архітектуру вбудованих систем, при цьому не враховується вплив штучного інтелекту на програмну архітектуру РТС у цілому і відсутній радіоканал.

Використання патерну «Стан» для малопотужних МК описано у [6], але використання цих результатів в даному випадку не доцільно, оскільки найбільшою популярністю для аналогічних рішень користуються МК архітектури ARM Cortex-M.

Основою програмної архітектури РТС з елементами штучного інтелекту можуть бути [7, 8]. У роботі [7] описаний базовий патерн «Стан» для архітектури мікроконтролера ARM Cortex-M. Сформульована методика тестування ефективності рішення. В той же час не врахований вплив ШІ на загальну архітектуру програмного рішення.

Робота [8] розкриває основи дослідження патерну «Стан» в контексті можливості додавання нових станів під час роботи системи з елементами ШІ. Але у цій роботі розглядається рішення програми для МК на рівні ПВВЗП (GPIO), без узагальнення результату в рамках РТС та РКС.

Архітектура патерну «Спостерігач» у контексті практичного застосування описана у [9–11]. В цих роботах не враховуються потреби узгодити різні технології програмування (БКРТС з повноцінною ОС та на основі МК у варіанті нескінченного циклу опитування або у системі переривань [5].

Для реалізації загальної архітектури доцільно розглянути рішення у варіанті патерну «Master-Slaves» [12]. Ця архітектура дозволяє керувати процесами, розподіляти завдання для ПРМ і отримати результати вимірювання від датчиків ПРМ, що виконують роль Slaves. Як показує практика, така архітектура використовується у наступних випадках:

- для управління складними і просторово розподіленими базами даних;
- для управління паралельними обчисленнями у високопродуктивних кластерних системах;
- в менеджменті складних мережевих інфраструктур для підвищення якості трафіку і удосконалення сервісу, тощо. Тобто архітектура на основі патерну «Master-Slaves» вимагає щоб і БКРТС

і контролери ПРМ були виконані з використанням повноцінної ОС, що суперечить обмеженням.

Постановка завдання. Отже, результати аналізу свідчать про достатню кількість робіт у цьому напрямку, при цьому опис базового аналога архітектури РТС для виконання поставленого завдання немає.

Таким чином метою статті є розробка програмної архітектури для складної РТС з потенційно можливим використанням штучного інтелекту. Базовий контролер має працювати з відносно дешевим периферійним рішенням ПРМ на основі патерну Стан. Програмні технології БКРТС і ПРМ у рамках РТС відрізняються за видом і рівнем складності.

Виклад основного матеріалу. З урахуванням постановки завдання і введених обмежень була проведена робота щодо оцінки використання найбільш прийнятних типових шаблонів (патернів) у архітектурі з присутністю головного контролера і підпорядкованих модулів.

На першому етапі розглянемо патерн «Master-Slave» як основу для архітектури РТС. При цьому буде ураховуватися наявність ШІ. В цілому патерн відповідає завданню. Він містить керівничий контролер (Master Node) і один (або декілька) підпорядкованих контролерів (Slave Node(s)). Для взаємодії цих компонентів вимагається складний комунікаційний протокол і механізм розподілу завдань. Це дуже важко виконати для ПРМ у рамках послідовних інтерфейсів (I²C, SPI, USART, тощо) або через ПБВЗП. Існують більш прості рішення у варіанті «Master-Slave» для

МК. Але вони вимагають використання RTOS, процес відбувається через багатопотоковість. В більш простих рішеннях для МК потрібно утворення нескінченних циклів опитування у БКРТС і у контролерах ПРМ. Таке рішення є прийнятним для ПРМ. В той же час вони є застарілим для програмної частини БКРТС. Такий програмний продукт важко супроводжується, модифікується і є неприйнятним для сучасних рішень.

Найбільш придатним варіантом реалізації архітектури для РТС на основі БКРТС і модулем ПРМ є патерн «Спостерігач» (Observer), оскільки він забезпечує ієрархію взаємодії БКРТС і ПРМ і розподіл завдань. Проте треба ураховувати, що класичне рішення «Спостерігач» (Observer) не можливо, з урахуванням введених обмежень тому, що класичний патерн «Спостерігач» (Observer) працює у рамках однієї програмної технології. Це демонструє рисунок з елементами UML (діаграми класів), що показана на рис. 1. Рисунок демонструє загальну архітектуру патерну «Спостерігач» (Observer) в контексті застосування до РТС. Вона, відповідно завданням і обмеженням, розділяється на дві базових частини.

Перша базова частина – це програмний модуль БКРТС з елементами штучного інтелекту, що виділений на рис. 1 окремою лінією. Він являє собою частину реалізації «Спостерігача» (Observer), а саме – елемент «Видавець».

Другу частину патерну «Спостерігач», а саме елемент «Підписник», реалізує ПРМ на базі МК, їх може бути декілька. За умовами вони містять програму на основі патерну «Стан». Про-

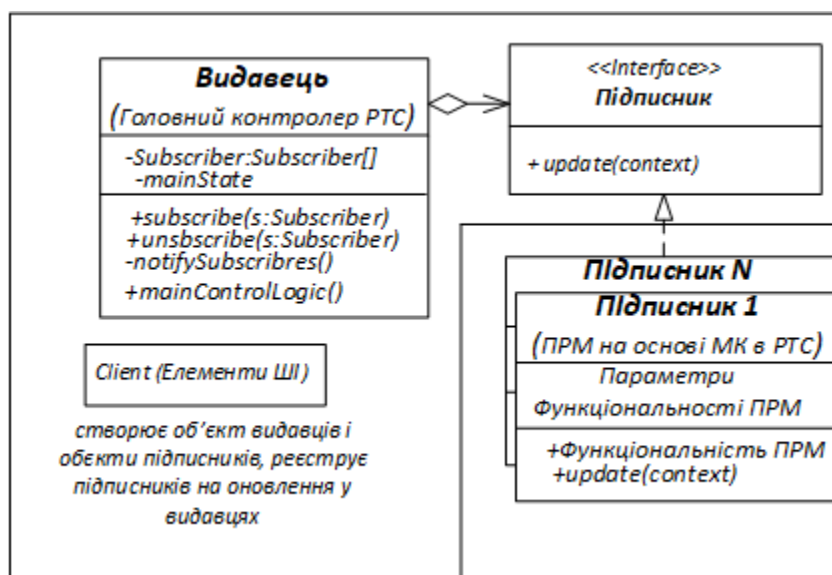


Рис. 1. Основа програмної архітектури у патерні «Спостерігач»

грами ПРМ відрізняється технологічно від програми БКРТС. Цей модуль, відповідно завданню, зв'язаний з «Видавцем» через послідовні інтерфейси (I²C, SPI, USART, тощо) або через ПБВЗП (GPIO). Тобто просте наслідування, як показано на рис. 1, у програмній архітектурі для РТС, у варіанті БКРТС – ПРМ не можливо. Потрібно допрацювання архітектурного рішення.

Така програмна архітектура РТС та РКС з складовими штучного інтелекту показана на рис. 2, на схемі, що містить елементи UML (диграми класів).

У цьому варіанті до базового патерну «Спостерігач» у БКРТС внесені суттєві зміни. До програмної частини БКРТС додано два нових елемента. Перший елемент призначений для кодування повідомлень «Видавця», оскільки ПРМ зв'язаний з БКРТС через послідовний інтерфейс МК. Крім того до операційної системи БКРТС додаються драйвери для взаємодії мікрокомп'ютера і ПРМ.

Таким чином БКРТС є не просто елементом патерну «Спостерігач», він є активним керівним блоком, що може аналізувати і виконувати координацію роботи ПРМ (підписника). Це стає можливим оскільки «Видавець» працює у сполу-

ченні з «Підписником» в рамках патерну «Спостерігач». Програмна частина ПРМ побудована на основі патерну стан (State). Таким чином в даній архітектурі роль «Підписників» відіграють ПРМ радіотехнічної системи. Звичайно, що взаємну роботу БКРТС і ПРМ реалізують програмний модуль для кодування сповіщень і драйвери послідовних інтерфейсів БКРТС.

Рольову модель програмної архітектури забезпечують елементи штучного інтелекту БКРТС. Взаємодія між елементами архітектури «Видавець» і «Підписник» (між БКРТС і ПРМ) може бути синхронною (варіант роботи патерну «Стан» ПРМ у нескінченному циклі опитування [5]). Доступний також асинхронний режим. Це варіант роботи патерну «Стан» ПРМ у режимі виконання переривань МК [5].

Апаратна складова, що реалізує ПРМ, розробляється на основі розповсюджених дешевих МК, у багатьох випадках застосовуються МК на базі архітектури Advanced RISC Machine (ARM) Cortex-M [7, 8] або інші рішення аналогічної потужності. Елементи ПРМ на базі цього класу мікроконтролерів (Cortex-M) не можуть повною мірою реалізовувати програмні елементи ШІ. Уза-

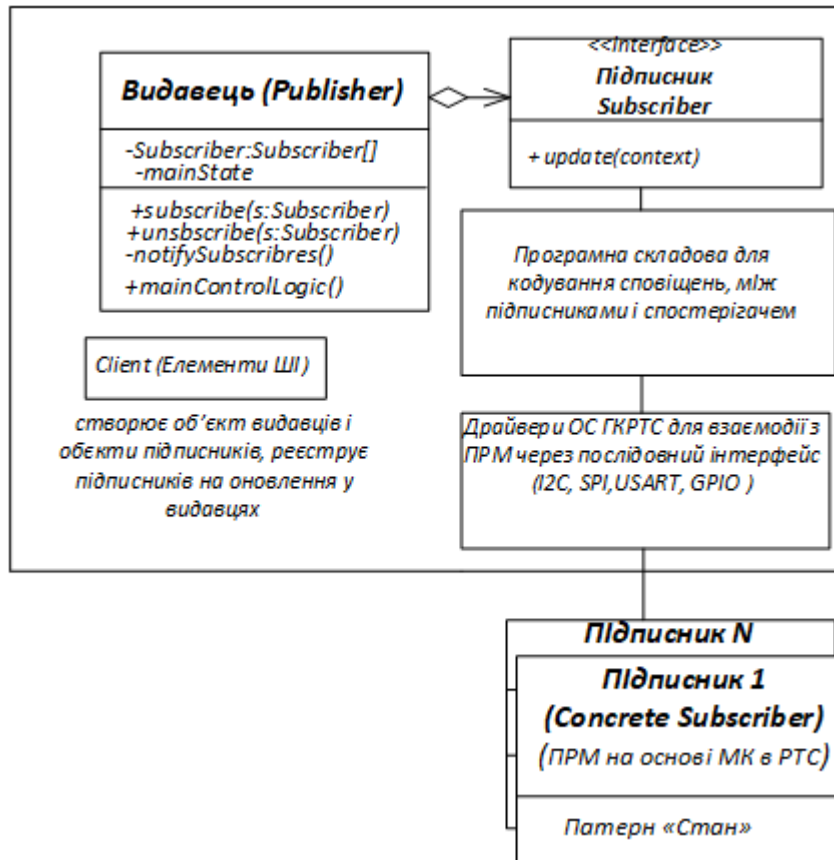


Рис. 2. Архітектура на базі патерну «Спостерігач»

гальнена схема програмно-апаратної інфраструктури РТС та РКС показана на рис. 3. Основна операційна система БКРТС реалізує елементи штучного інтелекту, має впроваджувати процес самонавчання, самооптимізації і реалізовувати самовідновлення. А модуль ПРМ виконує функції взаємодії із датчиками і виконавчими механізмами, надає на спостерігач інформацію для обробки ШІ.

Модулі ПРМ працюють у відомій версії шаблону «Стан» [7], що реалізує математичну модель КА. Основним недоліком цієї версії патерну «Стан» є потреба додавання нових станів на етапі розробки програмного забезпечення, у тому числі необхідно перепрограмування МК. Тобто після того, як був доданий новий стан, потрібно переписувати програму мікроконтролера. Використання такого підходу у даній архітектурі є суттєвим недоліком. Сама ідея самонавчання ШІ передбачає, що число станів у «Підписників» може динамічно змінюватися, відповідно програмна складова ПРМ має додавати цей стан у процесі роботи, без зупинення.

Від цього недоліку вільне рішення, що оприлюднено у роботі [8]. Таким чином БКРТС (рис. 3) використовує інформацію від програмної складової ПРМ. Обробляє результати, виконує

функції ШІ, в разі необхідності передає команду на створення додаткового стану у програмі ПРМ на основі МК.

Для перевірки прийнятності результату у практичному застосуванні у рамках даної архітектури була розроблена програма мовою C++ для мікроконтролера архітектури ARM Cortex-M на STM32F401. Під час аналізу оцінювалися часові показники програмного рішення з використанням можливостей MDK Keil. Для визначення часу між перемиканнями використана методика, що описана у [7, 8]. Результати показали прийнятність отриманого рішення.

Висновки. Із урахуванням поставлених умов і обмежень, була розроблена архітектура програмної складової для радіотехнічних системи з елементами штучного інтелекту на основі патерну «Спостерігач». Отримані архітектурні рішення можуть застосовуватися не тільки у РТС і системах радіокерування. Вони можуть бути використані у інших вбудованих інтелектуальних системах на базі ШІ.

Відмінністю архітектурного рішення від класичного патерну «Спостерігач» є об'єднання двох технологій програмування:

– програмних технологій для БКРТС, що доступні на повноцінних ОС;

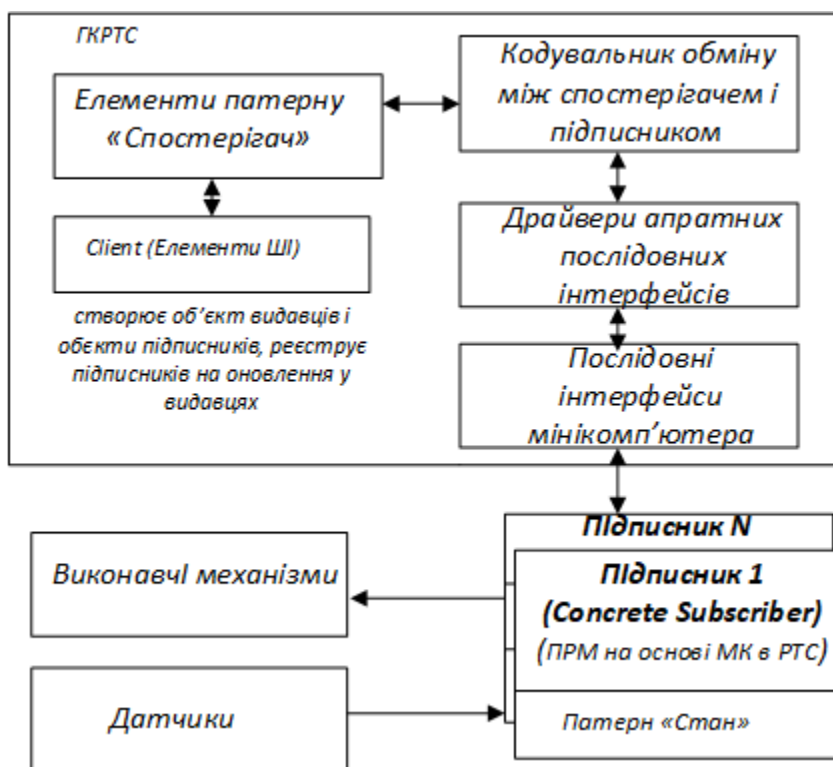


Рис. 3. Узагальнена схема програмно-апаратних складових

– технології програмування МК архітектури (ARM) Cortex-M у патерні «Стан» з можливістю динамічного додавання нових станів [8], у ООП парадигмі і процедурному варіанті, в синхронному і асинхронному режимах.

Перевагами архітектури є чітка модульність конструкції РТС, можливість розподілу завдань між розробниками класичного програмного забезпечення у ООП парадигмі на борту БКРТС і розробниками програм для мікроконтролера, що можуть працювати у різних парадигмах.

Висока надійність, легкість супроводження і налагодження програми БКРТС і програми ПРМ.

До потенційних недоліків можна віднести можливе перевантаження БКРТС, затримки під час обміну даними. В той же час з урахуванням умов і введених обмежень, ці недоліки не будуть впливати на загальну роботу системи.

У якості нового напрямку досліджень може бути розробка архітектури з використанням РТОС і наявністю багатопотоковості у ПРМ.

Список літератури:

1. Альперт С. І., Альперт М. І., Катін П. Ю., Літвінова Н. О. Програмно-апаратна інфраструктура наземної автономної платформи з елементами штучного інтелекту. *Математичні машини і системи*. 2021. № 1. С. 24–31. doi: 10.34121/1028-9763-2021-1-24-31.
2. Santos P. H. O., Soares G. L., Machado-Coelho T. M., Godinho de Oliveira B. A., Ekel P., Freitas F., Martins C. A. Multi-objective genetic algorithm implemented on a STM32F407 microcontroller. *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) : proceedings*. Rio de Janeiro, 8–13 July 2018. Rio de Janeiro, 2018 P. 486–492.
3. Boutekkouk F., Mahalaine R., Zina M., Saliha L., Djouani R., Djalila B. Intelligent embedded software: new perspectives and challenges. *Intelligent System*. 2018. P. 3–22.
4. Lu J., Zhou H. Implementation of artificial intelligence algorithm in embedded system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. P. 1–11. doi: 10.1088/1742-6596/1757/1/012015
5. Chmelov V. O., Katin P. Y., Shemaev V. M. Development of typical «State» software patterns for Cortex-M microcontrollers in real time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3(9 (105)). P. 29–38.
6. Katin P. Y. Development of variant of software architecture implementation for low-power general purpose microcontrollers by finite state machines. *Eureka: Physics and Engineering*. 2017. No. 3. P. 49–55.
7. Катін П. Ю., Похиленко О. А. Шаблиони типу «Стан» для створення інфраструктури системного програмного забезпечення мікроконтролерів архітектури Cortex-M у режимі реального часу для вбудованих систем. *Електронне моделювання*. 2021. Т. 43, № 2. С. 51–67. URL: <https://emodel.org.ua/uk/archive-ukr/2021/43-2-u/c-51-67> (дата звернення: 25.05.2025).
8. Похиленко О., Катін П. Патерн «СТАН» для вбудованих систем з можливістю динамічного створення станів. *Технічні науки та технології*. 2021. № 1(23). С. 118–127. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/233571>. (дата звернення: 25.05.2025).
9. Understanding the Observer Pattern – Use Cases and Implementations Explained. URL: <https://surl.li/krnig> (дата звернення: 31.05.2025).
10. Kulkarni N., Bansal S. Observer Design Pattern Applied on Real-Life Store Use Case. *Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing*. 2022. Vol. 1(2). P. 1–6.
11. Observer Design Pattern. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/system-design/observer-pattern-set-1-introduction/> (дата звернення: 31.05.2025).
12. The Master-Slave Design Pattern. URL: <https://www.cs.sjsu.edu/~pearce/oom/patterns/behavioral/masterslave.htm> (дата звернення: 31.05.2025).

Katin P.Yu., Vyshnevyi S.V. SOFTWARE ARCHITECTURE OF THE RADIO SYSTEMS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ELEMENTS BASED ON THE “OBSERVER” PATTERN

The article explores the architecture of the software component of radio engineering systems, which enables the integration of various programming technologies across different components. At the core of the hardware architecture is a main controller based on a microcomputer with a full-fledged operating system or a similarly powerful microprocessor-based computing system equipped with artificial intelligence elements. This controller manages other components of the radio engineering system, which are implemented on simpler microcontrollers and serve as software-hardware interfaces between the main controller and sensors (actuators, radio modules, etc.).

In the course of the research, various architectural options and common design patterns were examined for their suitability in solving the problem of system architecture design. As a result, it was determined that

the 'Observer' design pattern is appropriate for this purpose. However, this pattern requires modification to accommodate the integration of different programming technologies.

It was found that the modified 'Observer' pattern should be implemented by adding new software elements. These elements include components that help distribute tasks. The distribution happens between the main controller of the radio engineering system with artificial intelligence elements and a secondary unit based on simple microcontrollers. The latter handles actuators and sensors using a simple microcontroller programmed according to the 'State' pattern.

Unlike known implementations of the 'Observer' pattern, the proposed architecture enables the integration of relatively simple microcontroller-based modules with complex solutions built on microcomputers that utilize full-fledged operating system technologies.

The obtained results can be applied to improve the software components of radio engineering, radio-controlled, and other embedded systems based on artificial intelligence of varying complexity and purpose.

Key words: *radio control systems, software architecture, object-oriented programming paradigm (OOP), procedural programming paradigm, artificial intelligence (AI), ARM Cortex-M architecture, robotic systems, observer pattern, radio engineering system, real-time operating system (RTOS).*

Дата надходження статті: 02.07.2025

Дата прийняття статті: 07.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Корчинський В.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Тимченко О.С.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ МЕТОД СУМІЩЕННЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

У статті пропонується метод суміщення дискретизованих сигналів з адитивним шумом, отриманих у заданій кількості часових інтервалів передачі або у низці спектральних інтервалів. Метод базується на кратномасштабному аналізі множини вихідних (первинних) даних і включає наступні етапи: 1) визначення коефіцієнтів вейвлет-розкладів усіх первинних сигналів; 2) формування лінійних комбінацій коефіцієнтів деталізуючи складових вейвлет-розкладів з різними ваговими коефіцієнтами; 3) реконструкція отриманого суміщеного сигналу шляхом оберненого вейвлет-перетворення.

Вагові коефіцієнти комбінації отримуються як розв'язок оптимізаційної задачі за критеріями: 1) максимізація квадратичної інформаційної ентропії; 2) максимізація відношення «сигнал/шум»; 3) мінімізація середньоквадратичної відмінності синтезованого сигналу від первинного сигналу з максимальною квадратичною інформаційною ентропією.

Пропонований метод забезпечує можливість варіювання вагових коефіцієнтів значущості критеріїв оптимізації.

Узагальнення пропонованого методу на багатовимірні цифрові сигнали (зокрема растрові зображення дистанційного зондування Землі) реалізоване шляхом попередньої редукції розмірності множини первинних сигналів на основі розгортки Пеано-Гільберта з наступною реалізацією запропонованого методу.

Встановлено, що структурна схожість синтезованого сигналу та первинних сигналів зменшується зі зменшенням їх інформаційних ентропій та відношення «сигнал/шум».

Синтезовані суміщені сигнали є лінійними комбінаціями вихідних первинних даних і утворюють узагальнені первинні дані, оптимізовані за інформаційними та енергетичними критеріями, для подальшого тематичного аналізу.

Здійснено порівняльний аналіз ортонормованих вейвлет-бузисів та встановлено, найбільшу ефективність за запропонованими критеріями оптимізації має базис Добеші четвертого порядку.

Пропонований метод забезпечує компроміс між вимогами збільшення відношення «сигнал/шум» і збереження інформативності синтезованих сигналів стосовно множини первинних сигналів та можливість управління значущістю критеріїв оптимізації.

Ключові слова: багатоканальний сигнал, квадратична інформаційна ентропія, відношення «сигнал/шум», дискретне ортонормоване вейвлет-перетворення, розгортка Пеано-Гільберта.

Постановка проблеми. На даний час широкого поширення набули системи передачі, у яких процес передавання здійснюється протягом декількох сеансів (системи з пріоритетним обслуговуванням, системи з випадковим доступом до інформаційного каналу, системи дистанційного зондування з фіксацією даних у низці спектральних каналів електромагнітного проміння – носія видової інформації тощо). Процес передачі сигналів у таких системах неминує супроводжу-

ється накладенням на сигнали завад (шумів), що зменшує достовірність передачі. У зв'язку з цим актуальна проблема суміщення даних, переданих протягом різних сеансів передачі та/або від різних джерел сигналів для отримання більш точної та достовірної інформації у порівнянні з даними від кожного джерела при подальшому тематичному аналізі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час збільшення інформативності сигнала

лів передачі розглядалося в основному в аспекті фільтрації каналних шумів (див., наприклад монографію [1, с. 352–439]). Існуючі методи суміщення даних (концепція Data Fusion [2]) розвинені у контексті отримання комбінацій вихідних первинних даних для формування інших первинних даних шляхом різних модифікацій методу головних компонент без кількісних оцінок їх інформативності [3, с. 150–230]. Питання, пов'язані з оптимальним управлінням параметрами суміщення за критеріями мінімізації рівня завад при цьому не розглядалися.

Постановка завдання. Розглядається сукупність дискретизованих сигналів з адитивним шумом, отриманих у заданій кількості часових інтервалів (або у низці спектральних інтервалів). Мета статті полягає у формулюванні методу суміщення цих первинних даних у єдиному об'єкті зі збільшеною інформаційною значущістю, оптимізованою за її різними критеріями, включаючи максимізацію відношення «сигнал/шум» (SNR), мінімізацію інформаційної відмінності синтезованого сигналу від первинного сигналу з максимальною інформаційною ентропією.

Виклад основного матеріалу. Використаємо запропоноване у роботах [4, 5] подання дискретизованого інформаційного сигналу $S_m(n)$, $n=1, \overline{N-1}$, отриманого у m -му часовому інтервалі передачі (або у m -му спектральному інтервалі), по одному з ортонормованих вейвлет-базисів на першому рівні декомпозиції:

$$S_m(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k^{(m)} \cdot \phi_k(n) + \sum_{k=0}^{N-1} d_k^{(m)} \cdot \psi_k(n), \quad (1)$$

де $\phi_k(n)$, $\psi_k(n)$ – відповідно масштабуючі та деталізуючі базисні функції вейвлет-базису.

Таке подання первинних сигналів забезпечує можливість виокремлення їхніх високочастотних складових, пов'язаних з каналним шумом.

Формування суміщеного сигналу здійснюємо на основі лінійних комбінацій деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-розкладів первинних сигналів кількості M з різними ваговими коефіцієнтами a_i ($i=1, \overline{M}$):

$$D_k = \sum_{i=1}^M a_i \cdot d_k^{(i)}. \quad (2)$$

Реконструкція синтезованого суміщеного сигналу здійснюватиметься зворотнім вейвлет-перетворенням.

Визначення вагових коефіцієнтів a_i ($i=1, \overline{M}$) формулюємо як багатокритеріальну оптимізаційну задачу за наступними критеріями:

1) максимізація квадратичної інформаційної ентропії, $E = -\log_2 \left(\sum_{i=0}^{N-1} p_i^2 \right)$;

2) максимізація відношення «сигнал/шум»;

3) мінімізація середньоквадратичної відмінності синтезованого сигналу $R(n)$ від первинного сигналу з максимальною квадратичною інформаційною ентропією $S_{\max}(n)$,

$$\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} [R(n) - S_{\max}(n)]^2}.$$

Для розв'язання поставленої оптимізаційної задачі використано метод, відомий під назвою «goal attaine method», який забезпечує можливість попереднього завдання вагових коефіцієнтів значущості критеріїв оптимізації [6, с. 322–348].

На рис. 1 подано фрагмент залежностей від номеру відліку чотирьох первинних сигналів з різними значеннями інформаційної ентропії та однаковим відношенням «сигнал/шум» 7.5 дБ. Динаміка суміщеного сигналу, сформованого при однаковій значущості критеріїв оптимізації, наведена на рис. 2.

У наступній таблиці наведені інформаційні показники первинних інформаційних сигналів.

Квадратична інформаційна ентропія синтезованого сигналу дорівнює 8.3271 біт, відношення «сигнал/шум» складає 5.923 дБ, що суттєво перевищує відповідні значення первинних сигналів.

Узагальнення на випадок багатовимірних цифрових сигналів (зокрема растрових зображень) здійснюється шляхом попередньої редукції їх розмірності на основі розгортки Пеано-Гільберта [7] з наступною реалізацією запропонованого методу.

На рисунках 3–6 наведені зображення дистанційного зондування, зафіксовані у чотирьох спектральних каналах електромагнітного проміння – носія видової інформації з різними значеннями інформаційних ентропій та однаковою дисперсією адитивного гаусівського шуму 0.04. Зазначимо, що інформативність первинних зображень збільшується при зменшенні довжини хвилі електромагнітного проміння – носія видової інформації.

Інформативність наведених первинних зображень збільшується при зменшенні довжини хвилі електромагнітного проміння – носія видової інформації.

На рисунку 7 подане синтезоване (суміщене) зображення, отримане за однокової значущості використаних критеріїв оптимізації,

Сформоване суміщене зображення має суттєво більшу інформативність, що підтверджується й на рівні візуального сприйняття.

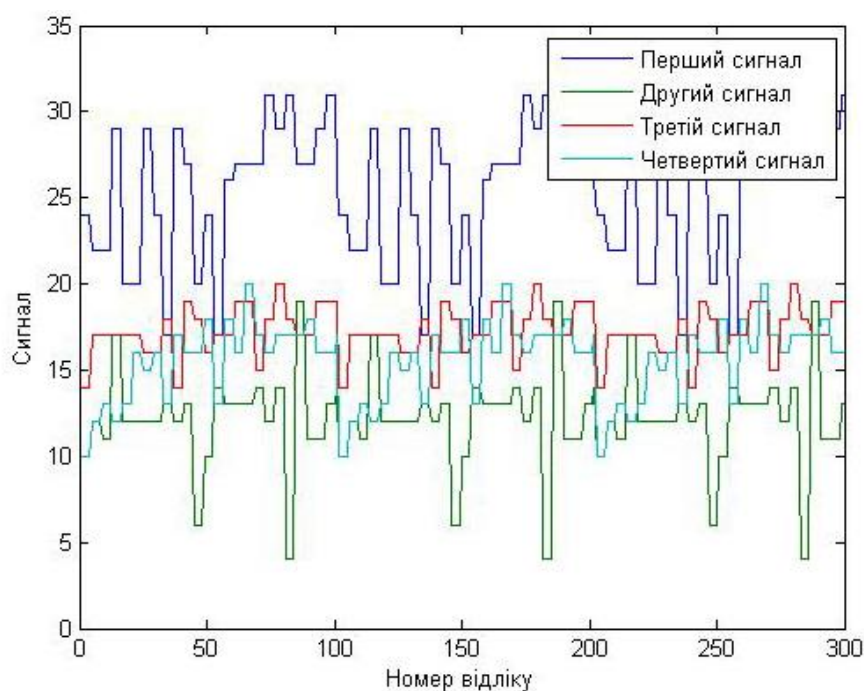


Рис. 1. Динаміка первинних інформаційних сигналів

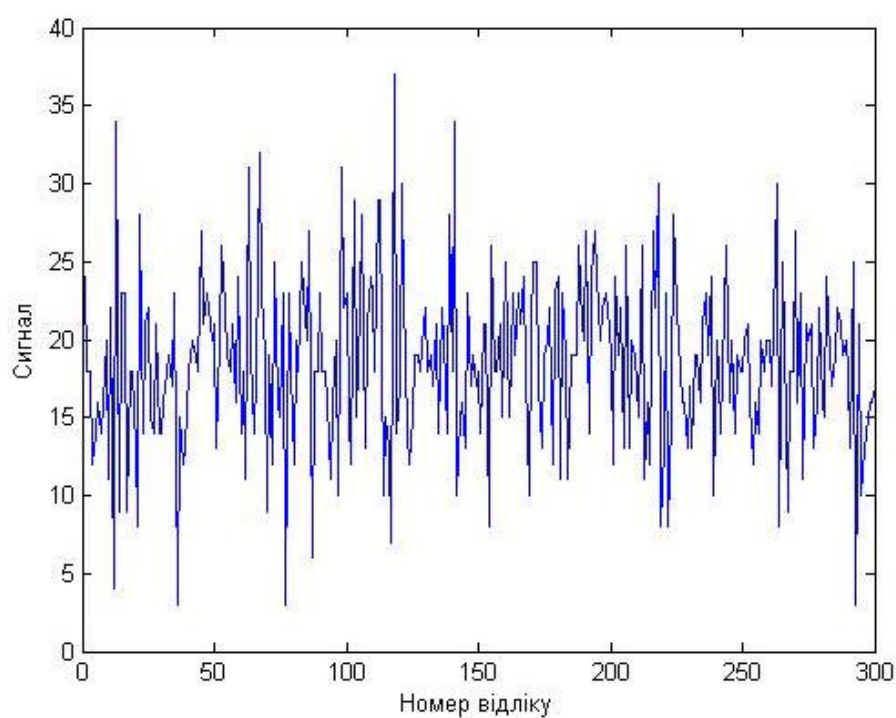


Рис. 2. Динаміка синтезованого (суміщеного) сигналу

Таблиця 1

Інформаційно-енергетичні показники первинних сигналів

Показник	Перший сигнал	Другий сигнал	Третій сигнал	Четвертий сигнал
Квадратична інформаційна ентропія, біт	6.8683	7.2738	7.2111	7.6579
Відношення «сигнал/шум», дБ	4.1385	4.3738	5.4217	5.6732

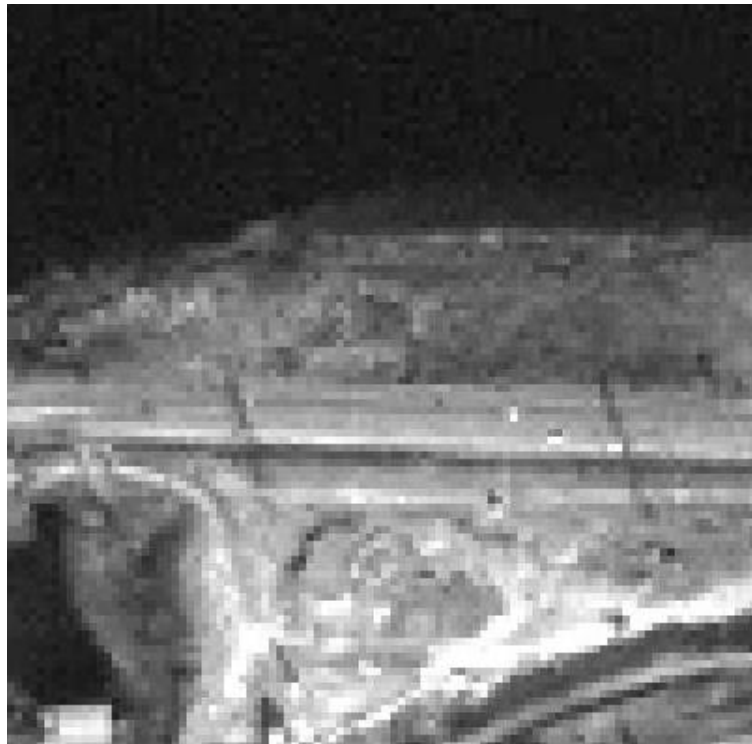


Рис. 3. Зображення спектрального каналу 0.45 мкм – 0.53 мкм (інформаційна ентропія 6.8893 біт)

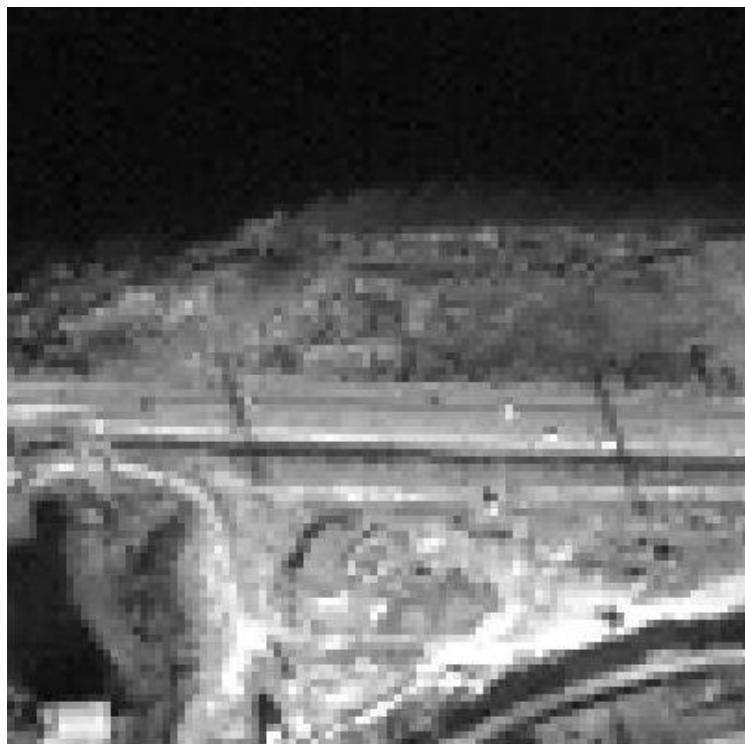


Рис. 4. Зображення спектрального каналу 0.52 мкм – 0.61 мкм (інформаційна ентропія 6.3267 біт)

У результаті порівняльного аналізу ортонормованих вейвлет-базисів за використаними інформаційними критеріями встановлено найбільшу ефективність базису Добеші (db4).

Висновки. Запропоновано новий метод суміщення дискретизованих сигналів з адитивним шумом, отриманих у заданій кількості часових інтервалів передачі або у низці спектральних

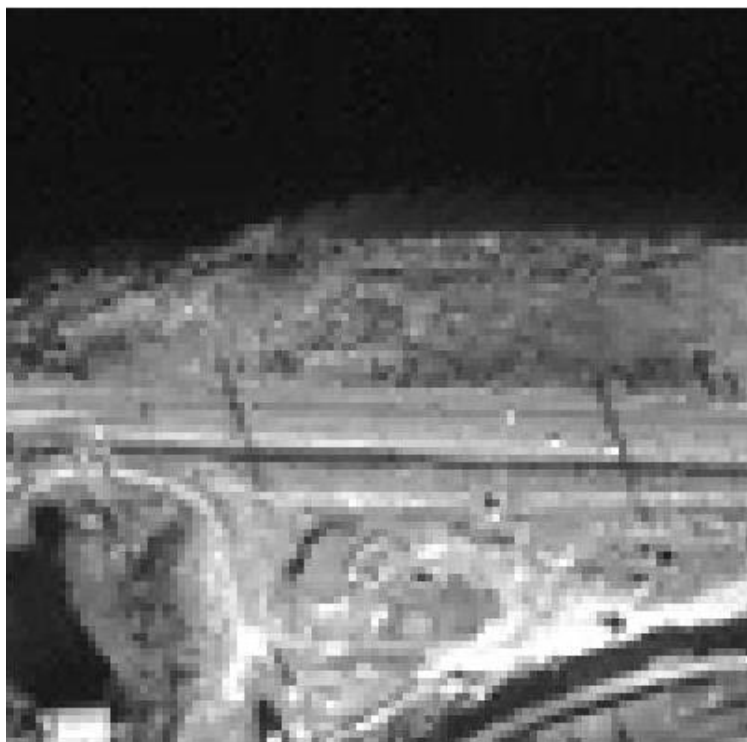


Рис. 5. Зображення спектрального каналу 0.64 мкм – 0.72 мкм (інформаційна ентропія 6.0937 біт)

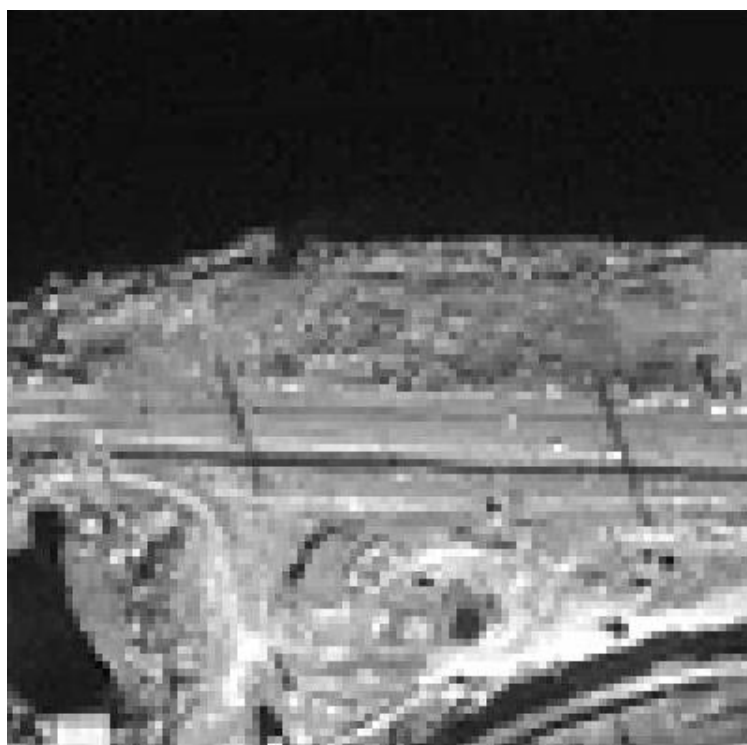


Рис. 6. Зображення спектрального каналу 0.77 мкм – 0.88 мкм (інформаційна ентропія 5.8742 біт)

інтервалів, оптимізований за інформаційними та енергетичним критеріями. Подальші дослідження за проблематикою статті будуть спрямовані на збільшення пропускну здатності інформаційних

каналів передачі багатокомпонентних сигналів, швидкості передачі у телекомунікаційних системах з випадковим доступом та ідентифікації інформаційних сигналів.

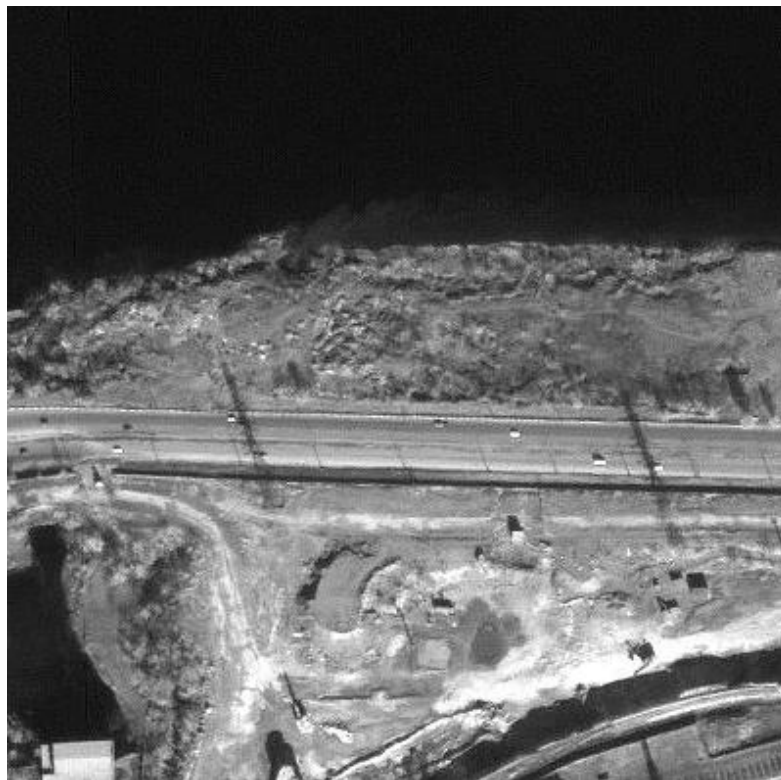


Рис. 7. Синтезоване зображення (інформаційна ентропія 7.1352 біт)

Список літератури:

1. Proakis J.G., Manolakis D. Digital Signal Processing. Principles, Algorithms and Application. London: Prentice-Hall International, 2007. 948 p.
2. Mahler R. Optimal/robust distributed data fusion: a unified approach. *Proceedings of SPIE*. 2000. – Vol. 4052: *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition*. – No. 4. – P. 128-138.
3. Raon J. R. Data Fusion Mathematics: Theory and Practice. N.-Y.: Taylor & Francis, 2017. 600 p.
4. Корчинський В. Фільтрація завад багатоспектральних цифрових сигналів: оптимізаційний підхід // *Прикладні питання математичного моделювання*. 2023. Том 6, № 4. С. 93-99.
5. Корчинський В. Оптимізація пропускну здатності інформаційних каналів передачі растрових зображень // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35(74). № 4. С. 33-37.
6. Steur R.E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application. N.-Y.: John Wiley&Sons Inc., 1986. 546 p.
7. Sagan K. Space-Filling Curves. N.-Y.: Springer-Verlag. 1994. 352 p.

Korchynskyj V.M., Tymchenko O.S. OPTIMIZATION METHOD FOR COMBINING MULTI-CHANNEL INFORMATION SIGNALS

The article proposes a method for combining discretized signals with additive noise, obtained in a given number of transmission time intervals or in a series of spectral intervals. The method is based on a multi-scale analysis of a set of initial (primary) data and includes the following stages: 1) determination of the coefficients of the wavelet distributions of all primary signals; 2) formation of linear combinations of coefficients detailing the components of wavelet distributions with different weighting coefficients; 3) reconstruction of the obtained combined signal by inverse wavelet transform.

The weighting coefficients of combinations are obtained as a solution to the optimization problem according to the criteria: 1) maximization of the quadratic information entropy; 2) maximization of the signal/noise ratio; 3) minimization of the mean square difference of the synthesized signal from the original signal with the maximum quadratic information entropy.

The proposed method provides the possibility of varying the weighting coefficients of the significance of the optimization criteria.

The generalization of the proposed method to multidimensional digital signals (in particular, raster images of remote sensing of the Earth) is implemented by preliminary reduction of the dimensionality of the set of primary signals based on the Peano-Hilbert sweep with subsequent implementation of the proposed method.

It has been shown that the structural similarity of the synthesized signal and the original signals decreases with a decrease in their information entropies and the signal-to-noise ratio.

The synthesized combined signals are linear combinations of the original primary data and form generalized primary data, optimized according to information and energy criteria, for further thematic analysis.

A comparative analysis of orthonormal wavelet basis sets was carried out and it was established that the fourth-order Daubechies basis set has the greatest efficiency according to the proposed optimization criteria.

The proposed method provides a compromise between the requirements of increasing the signal-to-noise ratio and preserving the informativeness of the synthesized signals in relation to the set of primary signals, and the ability to control the significance of the optimization criteria

Key words: *multichannel signal, quadratic information entropy, signal-to-noise ratio, discrete orthonormal wavelet transform, Peano-Hilbert sweep.*

Дата надходження статті: 29.07.2025

Дата прийняття статті: 28.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Пустовойтов П.Є.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Клавдієв В.П.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ МАСШТАБУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ПРОЦЕСУ ВІНЕРА ДЛЯ ХМАРНИХ ІНФРАСТРУКТУР

У статті розглядається проблема масштабування телекомунікаційних мереж у хмарному середовищі з урахуванням стохастичної природи навантаження. Актуальність дослідження зумовлена зростанням динамічності та непередбачуваності трафіку, що унеможливує ефективне управління ресурсами мережі традиційними, детермінованими методами. Основна увага приділяється моделюванню навантаження як стохастичного процесу з використанням математичного апарату Вінера.

У роботі запропоновано стохастичну модель масштабування, яка ґрунтується на диференціальному рівнянні Іто з випадковою компонентною, що описує флуктуації трафіку в реальному часі. Здійснено формалізацію задачі визначення моменту масштабування як задачі першого виходу навантаження за критичний поріг. Чисельна реалізація моделі проведена за допомогою методу Ейлера–Маруяма, що дало змогу отримати репрезентативні результати для аналізу поведінки системи в умовах змінного трафіку.

Результати моделювання підтвердили ефективність використання стохастичного підходу, що дозволяє не лише прогнозувати перевантаження, а й формувати адаптивні політики масштабування. Побудовані графіки траєкторій, довірчих інтервалів та гістограми часу до масштабування демонструють значущість випадкових відхилень і можливість їхнього врахування в системах управління. Виявлено залежність поведінки навантаження від параметрів моделі, що відкриває можливості для оптимізації інфраструктурних рішень.

У висновках обґрунтовано переваги моделі на основі процесу Вінера порівняно з детермінованими підходами. Також окреслено перспективні напрями подальших досліджень, зокрема інтеграцію фільтра Калмана для покращення точності прогнозів та використання марковських процесів прийняття рішень (MDP) для побудови оптимальних стратегій масштабування в телекомунікаційних системах.

Ключові слова: стохастична модель, телекомунікаційна мережа, хмарні інфраструктури, процес Вінера, метод Ейлера–Маруяма, прогнозування навантаження, адаптивне управління ресурсами, оптимальне масштабування.

Постановка проблеми. Масштабування телекомунікаційних мереж, зокрема в умовах хмарних обчислювальних середовищ, є одним із ключових завдань сучасної інфокомунікаційної інженерії. Стрімке зростання обсягу передаваних даних, динамічне підключення нових користувачів та варіативність сервісного трафіку вимагають від мережевих інфраструктур здатності швидко адаптуватися до змін навантаження. У традиційних підходах до масштабування передбачається наявність заздалегідь визначених сценаріїв або політик, проте на практиці такі системи часто

виявляються неефективними в умовах високої невизначеності та нестабільної поведінки користувачів. Це обумовлює необхідність пошуку нових моделей, здатних враховувати випадкову природу навантаження та динамічно реагувати на неї в реальному часі.

Однією з основних проблем масштабування в хмарному середовищі є непередбачуваність трафіку. Коливання навантаження можуть бути спричинені як поведінкою користувачів, так і зовнішніми подіями (наприклад, інформаційними сплесками, рекламними кампаніями, кібе-

ратаками тощо). У таких умовах система повинна не лише своєчасно виявити зміни, а й визначити момент, коли масштабування стане необхідним для забезпечення належної якості обслуговування. Детерміновані моделі не завжди дозволяють адекватно описати таку поведінку, оскільки ігнорують стохастичну природу змін. Тому актуальним є перехід до моделей, у яких навантаження розглядається як випадковий процес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У дослідженнях масштабування телекомунікаційних систем розглядають детерміновані та стохастичні підходи до прогнозування трафіку. Детерміновані методи ґрунтуються на передбачуваності навантаження, прості у реалізації та маловитратні, але не враховують випадкові флуктуації, що знижує ефективність в умовах нестабільності.

Стохастичні моделі, зокрема на основі процесу Вінера, краще відображають випадкову природу трафіку й дозволяють приймати адаптивні рішення, однак потребують більше ресурсів і складніші в реалізації.

Зокрема, дослідження [1] пропонує модель прогнозування трафіку, що поєднує нейронні мережі з процесом Вінера для адаптивного навчання тенденцій деградації в даних. Перевагою цього підходу є здатність моделі адаптуватися до різних сценаріїв деградації, однак складність реалізації та необхідність значних обчислювальних ресурсів можуть бути недоліками.

Інше дослідження [2] аналізує використання фізично-інформованих нейронних мереж, підтримуваних процесом Вінера, для прогнозування деградації систем. Цей підхід дозволяє враховувати фізичні закономірності процесів деградації, що підвищує точність прогнозування. Однак, інтеграція фізичних моделей з нейронними мережами може бути складною та вимагати детального налаштування.

У роботі [3] розглядається використання стохастичних блокових моделей для аналізу складних мереж. Перевагою є можливість виявлення прихованих структур у мережах, проте застосування цих моделей може бути обмежене великими обчислювальними витратами та складністю інтерпретації результатів.

Дослідження [4] пропонує метод оцінки стану трафіку з використанням стохастичних трьохдефекторних моделей. Цей підхід забезпечує високу точність оцінки, але може вимагати значних обчислювальних ресурсів та складних налаштувань.

У роботі [5] проведено критичний огляд методів прогнозування для стохастично деградує

систем, що дозволяє визначити основні тенденції та проблеми в цій галузі. Перевагою є комплексний аналіз існуючих підходів, проте відсутність практичних рекомендацій може бути недоліком.

Огляд [6] присвячений використанню глибокого навчання для прогнозування трафіку в стільникових мережах. Підкреслюється покращення точності прогнозування, однак зазначається необхідність великих обсягів даних для навчання моделей та висока обчислювальна складність.

Дослідження [7] пропонує підхід до навчання інтерпретованої динаміки стохастичних складних систем з використанням графових нейронних мереж. Перевагою є можливість моделювання складних взаємодій у системах, проте складність моделі може ускладнювати її практичне застосування.

У роботі [8] розглядається використання стохастичних геометричних моделей для аналізу продуктивності інтегрованих систем зв'язку та сенсорики. Цей підхід дозволяє враховувати просторову випадковість елементів мережі, але може бути складним для реалізації в реальних умовах.

Дослідження [9] аналізує використання детермінованих та стохастичних компонентів у моделюванні трафіку. Підкреслюється важливість врахування обох компонентів для підвищення точності моделей, однак зазначається складність їх інтеграції.

Робота [10] присвячена порівнянню детермінованих та стохастичних моделей класифікації в машинному навчанні. Відзначається, що стохастичні моделі можуть краще враховувати невідомості у даних, проте детерміновані моделі часто є більш інтерпретованими та простими у реалізації.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка математичної моделі масштабування телекомунікаційної мережі, яка базується на стохастичному диференціальному рівнянні з процесом Вінера. Такий підхід дозволяє формалізувати динаміку навантаження як сукупність детермінованої тенденції та випадкових флуктуацій. Модель передбачає опис поведінки системи за допомогою рівнянь Іто, що забезпечує точну симуляцію непередбачуваних змін трафіку й дозволяє прогнозувати моменти перевищення порогового навантаження, за яких виникає потреба в масштабуванні. Запропонована концепція є кроком до побудови адаптивних систем управління ресурсами, здатних забезпечити надійність та ефективність функціонування хмарних мереж в умовах динамічного середовища.

Виклад основного матеріалу. Теоретичні основи процесу Вінера.

У дослідженнях масштабування телекомунікаційних мереж за умов змінного трафіку виникає потреба в математичних інструментах для опису стохастичної динаміки навантаження. Одним із базових у цьому контексті є процес Вінера, або стандартний броунівський рух, що моделює випадкові неперервні зміни в часі й слугує основою теорії стохастичних диференціальних рівнянь.

Цей процес має нульове початкове значення, незалежні прирости з нормальним розподілом та неперервні, хоч і майже скрізь недиференційовні траєкторії. Поєднання неперервності й випадковості робить його особливо придатним для моделювання мережевого трафіку, який у хмарній інфраструктурі змінюється нерівномірно та непередбачувано. Обсяги даних, кількість користувачів і запитів зазнають значних коливань, що складно описати детермінованими моделями.

Процес Вінера дозволяє врахувати ці коливання через включення стохастичного шуму до математичних моделей, що описують зміну навантаження. У рамках диференціального підходу це реалізується за допомогою стохастичних диференціальних рівнянь (СДР), у яких випадкова компонента моделюється як диференціал процесу Вінера. Типове стохастичне рівняння має вигляд

$$dX(t) = \mu(X(t), t)dt + \sigma(X(t), t)dW(t), \quad (1)$$

де $X(t)$ – досліджувана мережева змінна (наприклад, навантаження на сервер, маршрутизатор або канал зв'язку), μ – функція дрейфу, яка відповідає детермінованій частині процесу, а σ – коефіцієнт дифузії, що масштабує випадкові флуктуації. Процес Вінера $W(t)$ задає випадковий шум і є джерелом непередбачуваних змін у системі. Таким чином, рівняння описує, як змінюється стан мережі внаслідок як передбачуваних тенденцій, так і непередбачуваних подій.

Застосування процесу Вінера в масштабуванні мереж обґрунтоване його здатністю відображати динамічні коливання навантаження в реальному часі, що особливо актуально для хмарних середовищ із варіативним трафіком. Модель дозволяє не лише аналізувати стан системи, а й прогнозувати перевищення критичних порогів, створюючи основу для адаптивних алгоритмів масштабування.

Його аналітична простота, добре вивчені властивості та доступні методи апроксимації сприяють практичному застосуванню. Теоретично це

відкриває нові підходи до аналізу динамічних систем, а практично – дає змогу створювати адаптивні інфраструктури для ефективного управління ресурсами в мережах нового покоління.

Формування моделі.

Задача масштабування телекомунікаційної мережі в умовах стохастичної динаміки навантаження формулюється як задача визначення моментів часу та умов, за яких необхідне збільшення або зменшення мережевих ресурсів для забезпечення якісного обслуговування. Нехай мережева змінна $X(t)$ описує поточне навантаження на окремий сегмент мережі, наприклад, сумарну кількість запитів на обробку в серверному кластері або обсяг переданої інформації через маршрутизатор на момент часу t . Оскільки навантаження змінюється випадковим чином під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників, його динаміка моделюється стохастичним диференціальним рівнянням (СДР) у формі Іто.

Розглянемо модель навантаження як одновимірний процес, що задовольняє рівняння:

$$dX(t) = \mu(X(t), t)dt + \sigma(X(t), t)dW(t), \quad (2)$$

де $\mu(X(t), t)$ є детермінованою функцією (дрейфом), яка відображає середню тенденцію зміни навантаження в часі, $\sigma(X(t), t)$ є коефіцієнтом стохастичної дифузії, що відповідає амплітуді випадкових коливань, а $dW(t)$ – диференціал стандартного процесу Вінера.

Для аналітичного вивчення процесу навантаження припустимо, що дрейф є лінійним, а дифузія – сталою. Тоді рівняння набуває вигляду:

$$dX(t) = \alpha X(t)dt + \beta dW(t), \quad (3)$$

де $\alpha \in \mathbb{R}$ – параметр середнього темпу зростання навантаження, $\beta > 0$ – параметр сили випадкових коливань. Така модель є стохастичною версією рівняння експоненційного зростання з адитивним білим шумом. Загальний розв'язок цього рівняння можна знайти методом Іто і записати як:

$$X(t) = X(0) \exp \left[\left(\alpha - \frac{\beta^2}{2} \right) t + \beta W(t) \right]. \quad (4)$$

Цей розв'язок відображає вплив обох компонент: експоненційне зростання або спад навантаження з параметром $\pm$, скоригованим на дисперсію шуму, та випадкові флуктуації, що задаються процесом Вінера. Така форма розв'язку дозволяє моделювати вибухове зростання трафіку (наприклад, під час подій з піковим навантаженням), а також його можливу стабілізацію або спад.

Для потреб задачі масштабування розглядається порогова модель, у якій масштабування ініціюється, коли навантаження перевищує певне граничне значення X_{crit} . Визначимо момент масштабування як випадкову змінну τ , яка є першим моментом часу, коли навантаження перевищує заданий поріг:

$$\tau = \inf \{t > 0 : X(t) \geq X_{crit}\}. \quad (5)$$

Оцінка моменту τ є ключовою в контексті автоматизованого управління ресурсами. Відомо, що для геометричного броунівського руху, яким фактично є процес $X(t)$, задача першого виходу за поріг має аналітичні розв'язки в термінах розподілів hitting time. Зокрема, для фіксованого порогу і сталої початкової умови можна знайти щільність і математичне сподівання часу першого перевищення.

Крім того, для задачі адаптивного масштабування вводиться функціонал середньої вартості масштабування протягом фіксованого інтервалу часу $[0, T]$, наприклад:

$$J = E \left[\int_0^T C(X(t)) dt + \sum_{i=1}^{N_\tau} K \right], \quad (6)$$

де $C(X(t))$ – функція витрат на обслуговування поточного навантаження, K – фіксована вартість операції масштабування, N_τ – кількість подій масштабування на інтервалі $[0, T]$. Мінімізація цього функціонала може слугувати критерієм оптимізації у випадку, коли необхідно не лише прогнозувати момент масштабування, а й приймати рішення щодо доцільності його виконання з економічної точки зору.

У деяких випадках доцільно переходити до дискретизованої форми рівняння для чисельної реалізації, зокрема при моделюванні за методом Ейлера–Маруями. Нехай $t_k = k\Delta t$, тоді дискретне наближення процесу $X(t)$ записується як:

$$X_{k+1} = X_k + \alpha X_k \Delta t + \beta \sqrt{\Delta t} \cdot \xi_k, \quad (7)$$

де $\xi_k \sim N(0,1)$ – незалежні стандартні нормальні величини. Це дозволяє реалізувати стохастичну модель навантаження в симуляціях та оцінити статистичні характеристики часу масштабування, рівня завантаженості ресурсів, частоти перевищення порогу тощо.

Таким чином, сформована модель дозволяє поєднати динамічну зміну навантаження з ймовірнісним прогнозом перевантажень та економічними аспектами масштабування. Вона є гнучким інструментом для побудови адаптивних систем управління ресурсами в телекомунікаційних мережах та забезпечення їх стійкої роботи в умовах невизначеності.

Чисельна реалізація та експерименти.

Побудована аналітична модель масштабування мережі, що базується на стохастичному диференціальному рівнянні Іто з процесом Вінера, вимагає чисельної реалізації для аналізу поведінки навантаження в часі та оцінки ефективності механізмів масштабування. Оскільки точне аналітичне рішення можливе лише для обмеженої кількості випадків, практичне моделювання системи здійснюється за допомогою дискретної апроксимації методом Ейлера–Маруями. Цей метод дозволяє наближено інтегрувати стохастичне рівняння на фіксованій часовій сітці, що є придатним для симуляції випадкових траєкторій мережевого навантаження.

Розглянемо рівняння (3). Дискретизуємо часову область на відрізку $[0, T]$ з рівномірним кроком Δt , що дає часові вузли $t_0 = 0$, $t_1 = \Delta t$, $t_n = n\Delta t = T$, де $n = T / \Delta t$. Чисельна схема Ейлера–Маруями для даного рівняння набуває вигляду (7).

Для чисельного експерименту обираються параметри, що відповідають типовим умовам телекомунікаційної мережі. Наприклад, при моделюванні навантаження в хмарному середовищі значення α може приймати позитивні значення, що відображають загальну тенденцію до зростання трафіку, тоді як параметр β визначає інтенсивність стохастичних флуктуацій, спричинених поведінкою користувачів або зовнішніми подіями. Припустимо, що $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.2$, початкове значення $X_0 = 1.0$, інтервал моделювання $T = 100$, крок. За цих умов загальна кількість ітерацій становить $n = 10000$, і реалізується одна або кілька траєкторій X_k , які апроксимують розвиток навантаження в мережі.

Окрім генерації траєкторій, особливу увагу приділено задачі визначення моменту масштабування мережі. Як і в аналітичній постановці, при чисельному моделюванні вводиться порогове значення навантаження X_{crit} , яке вважається граничним для наявних ресурсів. Якщо для деякого k виконується умова

$$X_k \geq X_{crit}, \quad (8)$$

то фіксується момент масштабування $\tau_k = k\Delta t$. Таким чином, в межах кожної реалізації стохастичного процесу можливо обчислити статистики першого виходу за поріг, включаючи математичне сподівання $E[\tau]$, дисперсію $\text{Var}(\tau)$, а також частоту перевищення порогу для фіксованого інтервалу часу.

Для кількісної оцінки ефективності масштабування аналізується накопичене навантаження на мережу, що обчислюється як

$$A(T) = \int_0^T X(t) dt \approx \sum_{k=0}^{n-1} X_k \Delta t, \quad (9)$$

та кумулятивна кількість масштабувань $N(T)$, яка визначається як кількість випадків перевищення порогу X_{crit} на інтервалі $[0, T]$. На основі цих показників визначається інтегральна оцінка функціоналу вартості:

$$J \approx \sum_{k=0}^{n-1} C(X_k) \Delta t + N(T) \cdot K, \quad (10)$$

де $C(X_k)$ – поточні витрати, пов'язані з обробкою навантаження, а K – фіксована вартість масштабування. В результаті моделювання можливо дослідити залежність показника J від параметрів моделі α, β , порогу X_{crit} , та оцінити ефективність різних політик масштабування.

Побудовані графіки чисельних траєкторій (рис. 1) демонструють типову поведінку системи: плавне зростання навантаження з випадковими коливаннями навколо середнього тренду, раптові сплески, що призводять до досягнення критичного рівня, після чого вводиться масштабування. Повторюваність таких сценаріїв дозволяє оцінити імовірнісну природу динаміки навантаження і приймати рішення на основі статистичного аналізу. Таким чином, чисельна реалізація моделі не лише підтверджує її аналітичні властивості, але й дозволяє здійснювати практичне моделювання, прогнозування та оптиміза-

цію поведінки масштабованих телекомунікаційних систем.

На рис. 2 зображено середню траєкторію зміни навантаження $X(t)$, отриману шляхом усереднення 500 стохастичних реалізацій, а також відповідний 95% довірчий інтервал. Як видно з графіка, навантаження в середньому демонструє плавне експоненційне зростання, що відповідає характеру моделі з позитивним дрейфом $\alpha > 0$. Довірчі межі, побудовані на основі центральної граничної теореми, відображають розкид траєкторій навколо середнього і показують, що в окремих реалізаціях можливі значні відхилення від середнього значення. Чітке наближення верхньої межі до порогового значення $X_{crit} = 2.0$ і часте її перетинання підкреслює важливість обліку стохастичної природи навантаження при плануванні масштабування. Результати графічно ілюструють необхідність формування адаптивних стратегій управління мережею з урахуванням імовірнісного характеру зміни навантаження.

На рис. 3 представлено гістограму часу до першого перевищення критичного рівня навантаження $X_{crit} = 2.0$, тобто моменту, коли виникає потреба в масштабуванні системи. Аналіз розподілу показує, що більшість реалізацій досягають порогу протягом перших 4–6 секунд моделювання, однак існує значна варіативність у часі до події. Така форма розподілу відпові-

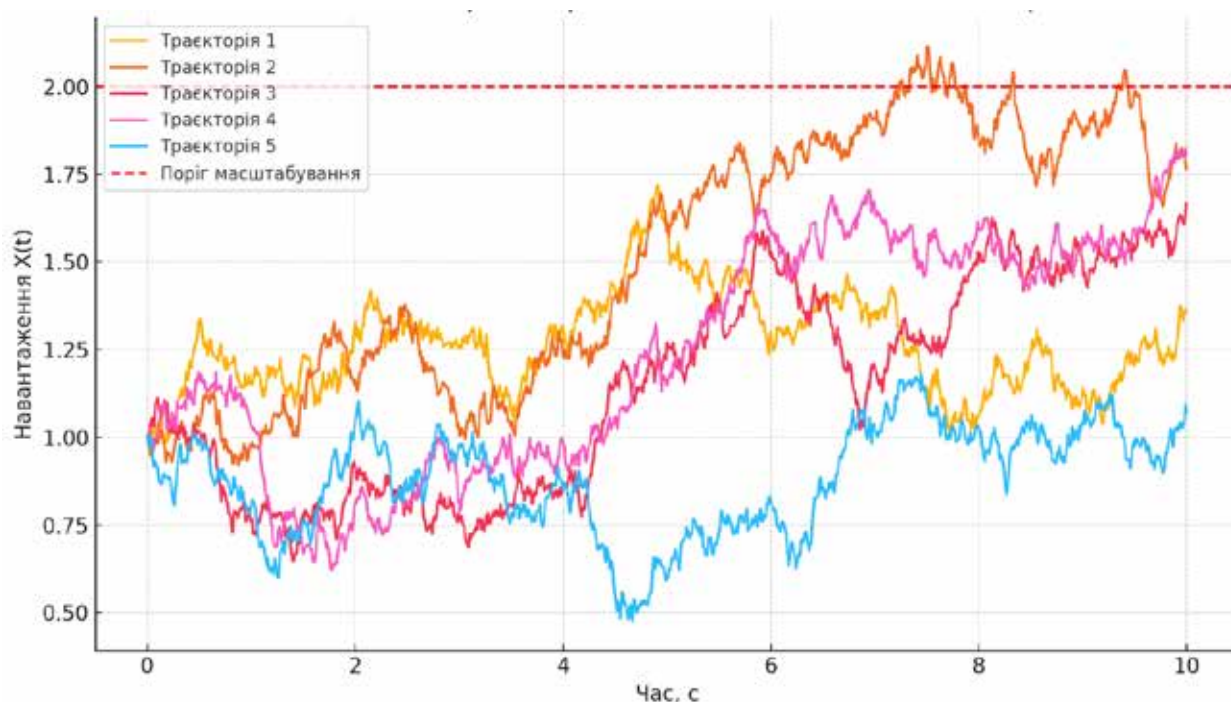


Рис. 1. Стохастичні траєкторії навантаження

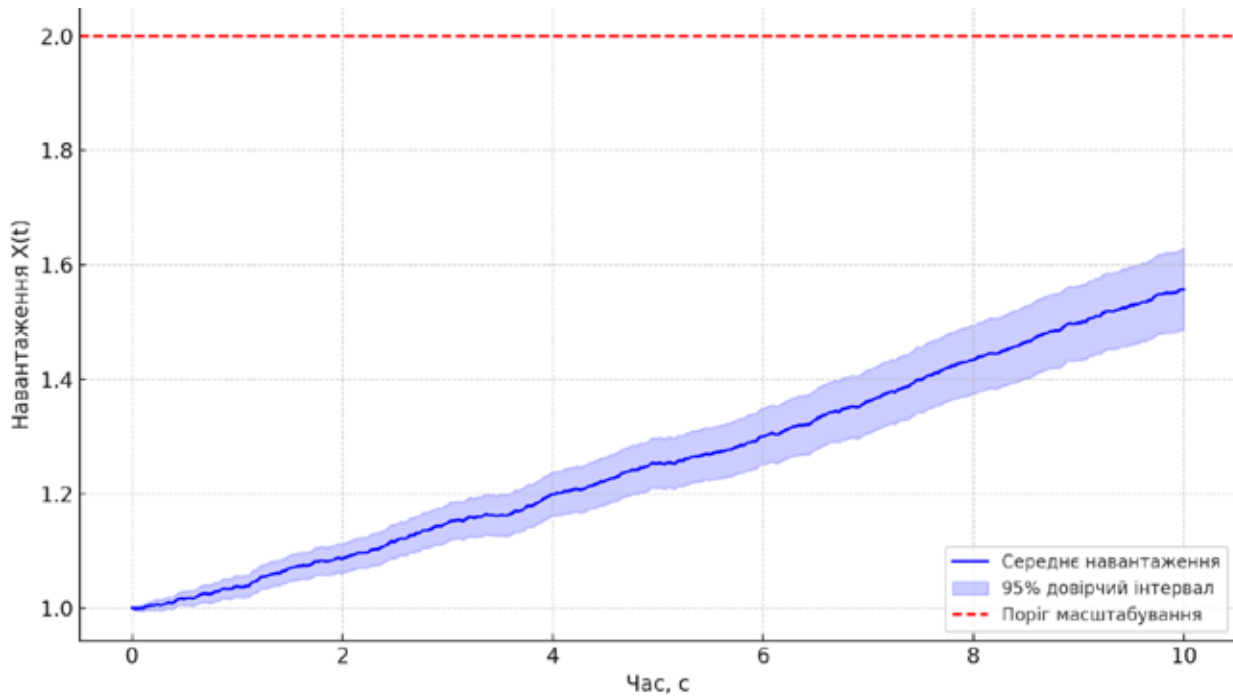


Рис. 2. Середнє навантаження та довірчий інтервал

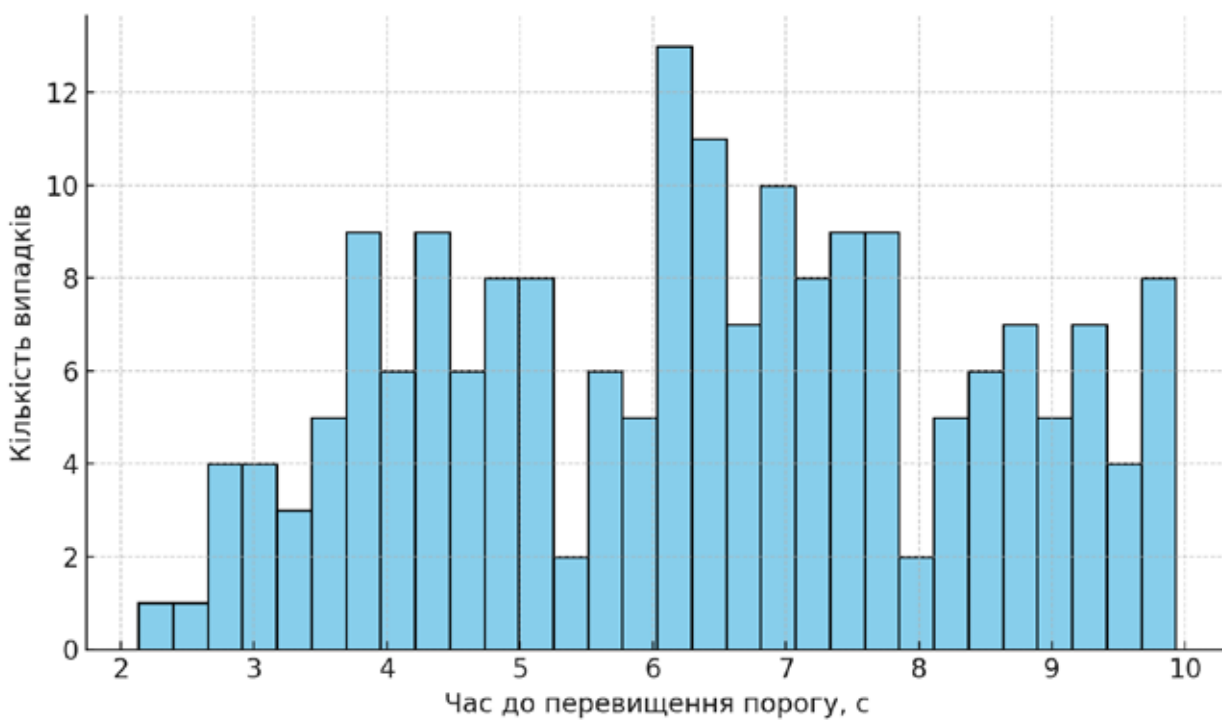


Рис. 3. Гістограма часу до першого масштабування

дає характеру hitting-time для геометричного броунівського руху з додатним дрейфом. Наявність «довгого хвоста» гістограми свідчить про те, що в окремих випадках навантаження може залишатися нижчим за критичний рівень упродовж тривалого часу, що вказує на непередба-

чуваність моменту масштабування в окремій реалізації. Отримані результати підкреслюють переваги стохастичного підходу в оцінці ризиків перевантаження та дозволяють визначити ймовірні часові інтервали, в яких бажано активувати додаткові ресурси.

На відміну від традиційних детермінованих підходів, де навантаження описується як передбачувана гладка функція часу, стохастична модель на основі процесу Вінера враховує випадкові флуктуації, характерні для сучасних телекомунікаційних мереж. Детерміновані моделі не відображають імпульсивні стрибки, пікові навантаження чи короткотривалі сплески активності, поширені в хмарних та розподілених системах.

Стохастичне моделювання дозволяє не лише відслідковувати середню поведінку трафіку, а й оцінювати ризики перевантаження, аналізувати час до перевищення порогу та формувати адаптивні політики масштабування.

Це робить модель з процесом Вінера гнучкішою та більш придатною до використання в умовах високої невизначеності, де класичні методи часто неефективні.

Результати моделювання та аналіз.

Проведення чисельного моделювання на основі запропонованої стохастичної моделі масштабування дозволяє дослідити динаміку навантаження в телекомунікаційній мережі та оцінити ефективність запропонованих підходів до адаптивного управління ресурсами. У цьому розділі наведено результати симуляцій для різних параметрів моделі, виконано порівняльний аналіз поведінки системи при зміні коефіцієнтів дрейфу та дифузії, а також проаналізовано вплив порогових значень навантаження на частоту масштабування та загальні витрати. Осо-

бливу увагу приділено інтерпретації стохастичних характеристик процесу та формуванню рекомендацій щодо практичного застосування моделі в умовах високої невизначеності та змінної структури трафіку.

У таблиці 1 представлено результати чисельного моделювання середнього часу до досягнення порогу масштабування $E[\tau]$ та дисперсії цього часу $Var(\tau)$ залежно від параметрів моделі. Параметр α відповідає детермінованому тренду зростання навантаження, тоді як β визначає інтенсивність стохастичних флуктуацій. Як видно з результатів, збільшення параметра β призводить до зменшення очікуваного часу до масштабування, що свідчить про зростання ймовірності швидкого перевищення порогового значення через посилення випадкових стрибків навантаження. Також спостерігається, що вищі значення α скорочують час до масштабування, навіть при однаковій інтенсивності шуму.

Ці результати підтверджують чутливість моделі до параметрів процесу Вінера та демонструють можливість керування частотою масштабування за рахунок налаштування відповідних коефіцієнтів. Дисперсія часу до масштабування дає уявлення про варіативність поведінки системи, що важливо при проектуванні політик масштабування з гарантованим рівнем надійності.

У таблиці 2 подано статистичні характеристики функціонування системи протягом фіксованого проміжку часу для кількох наборів пара-

Таблиця 1

Вплив параметрів моделі на середній час до масштабування

№	α	β	X_{crit}	$E[\tau](с)$	$Var(\tau)(с^2)$
1	0,05	0,1	2	36,12	12,34
2	0,05	0,2	2	22,87	16,91
3	0,1	0,1	2	15,65	8,25
4	0,1	0,2	2	9,41	10,72
5	0,1	0,2	3	19,83	11,1

Таблиця 2

Статистика моделювання навантаження (100 реалізацій)

Параметри моделі	Сер. навант., $\bar{X}(t)$	Макс., $X(t)$	К-ть масштабувань, $N(T)$	Функціонал, J
$\alpha = 0.05$, $\beta = 0.1$	1,74	2,85	3	12,8
$\alpha = 0.05$, $\beta = 0.2$	1,87	3,77	7	18,3
$\alpha = 0.10$, $\beta = 0.1$	2,44	4,12	6	16,5
$\alpha = 0.10$, $\beta = 0.2$	3,01	5,98	11	25,7

Таблиця 3

Середній функціонал вартості залежно від порогу масштабування

X_{crit}	$E[\tau], (c)$	К-ть масштабувань, $N(T)$	Функціонал, J
1,8	11,27	9	20,1
2	16,32	6	17,8
2,5	28,45	3	15
3	36,71	2	14,2
3,5	49,88	1	13,9

метрів моделі. Для кожного випадку розраховано середнє значення навантаження $\bar{X}(t)$, його максимальне значення, кількість випадків масштабування $N(T)$, а також значення функціоналу вартості J , що об'єднує витрати на обслуговування та масштабування.

Аналіз таблиці свідчить про логічну відповідність між зростанням параметрів α , β та збільшенням як середнього, так і пікового навантаження. Зокрема, при зростанні стохастичної компоненти β різко зростає частота масштабувань, що збільшує сумарну вартість керування системою. Це демонструє важливість правильного балансування між стійкістю системи та економічною ефективністю масштабування.

Отримані результати можуть бути використані для вибору оптимальних параметрів моделі, які забезпечують мінімізацію функціоналу витрат за умови дотримання допустимого рівня навантаження в системі.

Таблиця 3 ілюструє вплив вибраного порогового значення навантаження X_{crit} , при досягненні якого ініціюється масштабування, на ключові характеристики системи. Зокрема, подано середній час до першого масштабування $E[\tau]$, кількість масштабувань за період часу T , а також значення функціоналу вартості J .

Зі зростанням порогового значення навантаження системі потрібно більше часу для його досягнення, що зменшує частоту масштабувань і знижує витрати. Однак надто високі пороги можуть спричинити перевантаження та погіршити якість обслуговування. Це підтверджує наявність компромісу між частотою масштабування і допустимим рівнем навантаження.

Висновки мають практичну цінність для налаштування політики масштабування в хмарних

системах, де важливо зберігати баланс між продуктивністю та витратами на ресурси.

Моделювання дозволяє визначити моменти масштабування як точки перевищення критичного порогу навантаження, що дає змогу прогнозувати потребу в ресурсах. Оцінка стабільності здійснюється через аналіз дисперсії навантаження і часу масштабування, що відображає рівень флуктуацій. Адаптивність моделі проявляється в реакції на змінні умови трафіку, а ефективність – через аналіз середнього навантаження і частоти масштабувань.

Висновки. У дослідженні побудовано стохастичну модель масштабування телекомунікаційної мережі на основі диференціального рівняння Іто з процесом Вінера. Проведено аналітичний і чисельний аналіз навантаження з урахуванням флуктуацій, виявлено залежність моменту масштабування від параметрів дрейфу та дифузії. Результати моделювання підтверджують доцільність стохастичного підходу для оцінки ризиків перевантаження та формування адаптивних рішень з розподілу ресурсів.

Модель на основі процесу Вінера ефективно відображає імпульсні стрибки навантаження та дозволяє оцінювати ймовірність перевищення критичних порогів у динамічних умовах. Це забезпечує гнучке масштабування без надлишкового резервування ресурсів, що актуально для систем з оплатою за використання.

У подальшому доцільно впровадити фільтр Калмана для згладжування шуму та підвищення точності прогнозу, а також марковські процеси прийняття рішень (MDP) для оптимізації стратегій масштабування. Перспективним є також розширення моделі на багатовимірні сценарії з взаємодією кількох сервісних компонентів у розподілених хмарних середовищах.

Список літератури:

1. Liu, Di & Wang, Shaoping. *An artificial neural network supported stochastic process for degradation modeling and prediction. Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 214(C). DOI:10.1016/j.ress.2021.107738
2. He, Zhongze, Wang, Shaoping, Shi, Jian, Liu, Di, Duan, Xiaochuan, Shang, Yaoping. *Physics-informed neural network supported Wiener process for degradation modeling and reliability prediction. Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, vol. 258(C). DOI:10.1016/j.ress.2025.110906

3. Xueyan Liu, Wenzhuo Song, Katarzyna Musial, Yang Li, Xuehua Zhao, and Bo Yang. Stochastic Block Models for Complex Network Analysis: A Survey. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, Vol. 19(3). Article No.: 55, P. 1 – 35. DOI: 10.1145/3713076
4. Zhang Chenyang, Liu Xin, Zhuo Fan, Wang Zelin, Cheng Qixiu. Traffic State Estimation with Stochastic Three-Detector Modeling Considering Heteroscedasticity. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*. Vol. 151 (6). 2025. doi: 10.1061/JTEPBS.TEENG-8819
5. Zhiyuan Liu, Anfeng Jiang, Zhirui Wang, Zhen Zhou, Lue Fang, Qixiu Cheng, Ziyuan Gu. An integrated framework for multiple traffic anomalies detection on highways using vehicle trajectories. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2025. DOI: 10.1111/mice.13494
6. Xing Wang, Zhendong Wang, Kexin Yang, Zhiyan Song, Chong Bian, Junlan Feng, Chao Deng. A Survey on Deep Learning for Cellular Traffic Prediction. *Intell Comput*. 2024;3:0054.DOI:10.34133/icomputing.0054
7. Gao, TT., Barzel, B. & Yan, G. Learning interpretable dynamics of stochastic complex systems from experimental data. *Nat Commun*. 2024. Vol. 15, Art. 6029. DOI: 10.1038/s41467-024-50378-x
8. Ruibo Wang, Baha Eddine Youcef Belmekki, Xue Zhang, Mohamed-Slim Alouini. Network-Level Analysis of Integrated Sensing and Communication Using Stochastic Geometry. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2024. Vol: 7(4). P. 84 – 90. DOI: 10.1109/IOTM.001.2300202
9. Fan, T., Wong, S. C., Zhang, Z., & Du, J. Stochastic Lighthill-Whitham-Richards traffic flow model for nonlinear speed-density relationships. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2024. 12(1). DOI: 10.1080/21680566.2024.2419402
10. Oprocha, P., Czyżewska, N., Klimczak, K., Kusiak, J., Morkisz, P., Pietrzyk, M., Potorski, P., & Szeliga, D. A Comparative Study of Deterministic and Stochastic Models of Microstructure Evolution during Multi-Step Hot Deformation of Steels. *Materials*. 2023. Vol. 16(9), 3316. DOI: 10.3390/ma16093316

Pustovoitov P.Ye., Klavdiiev V.P. STOCHASTIC MODEL OF TELECOMMUNICATION NETWORK SCALPING BASED ON THE WINER PROCESS FOR CLOUD INFRASTRUCTURES

The article considers the problem of scaling telecommunication networks in a cloud environment taking into account the stochastic nature of the load. The relevance of the study is due to the increasing dynamism and unpredictability of traffic, which makes it impossible to effectively manage network resources using traditional, deterministic methods. The main attention is paid to modeling the load as a stochastic process using the Wiener mathematical apparatus.

The paper proposes a stochastic scaling model based on the Ito differential equation with a random component, which describes traffic fluctuations in real time. The problem of determining the scaling moment as the problem of the first load exceeding the critical threshold is formalized. The numerical implementation of the model was carried out using the Euler–Maruyama method, which made it possible to obtain representative results for analyzing the behavior of the system under variable traffic conditions.

The modeling results confirmed the effectiveness of using a stochastic approach, which allows not only to predict congestion, but also to form adaptive scaling policies. The constructed graphs of trajectories, confidence intervals, and histograms of time to scaling demonstrate the significance of random deviations and the possibility of their consideration in control systems. The dependence of the load behavior on the model parameters was revealed, which opens up opportunities for optimizing infrastructure solutions.

The conclusions substantiate the advantages of the model based on the Wiener process compared to deterministic approaches. Promising directions for further research are also outlined, in particular, the integration of the Kalman filter to improve the accuracy of forecasts and the use of Markov decision processes (MDP) to build optimal scaling strategies in telecommunication systems.

Key words: *stochastic model, telecommunication network, cloud infrastructures, Wiener process, Euler–Maruyama method, load forecasting, adaptive resource management, optimal scaling.*

Дата надходження статті: 22.07.2025

Дата прийняття статті: 30.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Савченко М.В.Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Меркуленко Ю.С.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Q-LEARNING І МАРКОВСЬКА ОПТИМІЗАЦІЯ: АДАПТИВНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ СПЕКТРОМ У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

У статті розглянуто поєднання Марковських моделей та алгоритмів навчання для вирішення задач динамічного доступу до спектра в когнітивних радіомережах. Особливу увагу приділено децентралізованому підходу, коли рішення про використання спектральних ресурсів приймаються кожним вузлом окремо на основі локальної інформації та адаптивного навчання. Основою для моделювання виступає Марковський процес прийняття рішень (MDP), який описує поведінку системи в умовах випадкових змін доступності спектра.

Основою для моделювання прийняття рішень виступає Марковський процес прийняття рішень (MDP), який дозволяє формалізувати поведінку агентів у середовищі зі стохастичною динамікою. У моделі враховується ймовірність переходу між станами спектра (наприклад, «зайнятий» або «вільний») та відповідні дії вузлів когнітивної мережі, які впливають на подальший розвиток подій. Таким чином, MDP виступає як математичний фундамент для реалізації алгоритмів навчання, що враховують довгострокові наслідки дій.

У статті докладно проаналізовано механізми взаємодії Марковських моделей із алгоритмами підкріплювального навчання, зокрема *Q-learning*, який дозволяє вузлам поступово вдосконалювати свої стратегії поведінки через процес проб і помилок. Навчання здійснюється на основі отриманих «нагород» за правильне використання спектра (наприклад, уникнення конфліктів із первинними користувачами) і «штрафів» за порушення (наприклад, інтерференцію). Вузли використовують *Q*-функцію для оцінки цінності дій у кожному стані та поступово оновлюють її з метою наближення до оптимальної політики.

Запропонована методика демонструє ефективність у задачах максимізації пропускної здатності та мінімізації інтерференції в умовах обмежених спектральних ресурсів. Проведений аналіз показує, що використання алгоритмів навчання на основі Марковських моделей дозволяє досягати балансу між дослідженням нових можливостей спектра та експлуатацією існуючих ресурсів. Це відкриває перспективи для створення більш автономних і адаптивних когнітивних мереж.

Ключові слова: когнітивні радіомережі, динамічний доступ до спектра, *Q-learning*, Марковський процес прийняття рішень (MDP), адаптивне управління спектром, інтерференція, автономні бездротові мережі, оптимізація спектральних ресурсів.

Постановка завдання. Сучасні бездротові мережі стикаються з гострою проблемою дефіциту радіочастотного спектра, спричиненою зростаючим попитом на передачу даних. У той же час, дослідження показують, що значна частина спектра використовується неефективно: багато частотних діапазонів залишаються недозавантаженими або зовсім вільними протягом тривалих періодів. Це створює потребу в розробці нових технологій

для оптимального розподілу спектральних ресурсів. Когнітивні радіомережі (CRN) пропонують перспективний підхід до вирішення цієї проблеми за рахунок динамічного доступу до спектра, що дозволяє вторинним користувачам використовувати незайняті діапазони без створення перешкод первинним користувачам.

Однією з ключових задач у когнітивних мережах є децентралізоване управління спектраль-

ними ресурсами. У децентралізованій моделі кожен вузол приймає рішення на основі локальної інформації, що дозволяє зменшити потребу в централізованому контролі, але водночас ускладнює координацію та підвищує ризик конфліктів. Тому виникає необхідність у розробці ефективних методів, які дозволять вузлам адаптуватися до змінних умов середовища та приймати оптимальні рішення в умовах невизначеності.

Марковські процеси прийняття рішень (MDP) є фундаментальним математичним апаратом для моделювання динамічного доступу до спектра. Вони дозволяють описувати поведінку системи, де стан спектра змінюється випадково, залежно від поточного стану та обраної дії. Однак у реальних умовах параметри середовища можуть бути невідомими, що ускладнює застосування традиційних методів оптимізації.

Для вирішення цієї проблеми в статті запропоновано використання алгоритмів навчання підкріплення, таких як Q-learning, які дозволяють вузлам когнітивної мережі навчатися оптимальним стратегіям управління спектром у реальному часі. Поєднання MDP із алгоритмами підкріплення забезпечує ефективну адаптацію до змінного середовища навіть за відсутності точних моделей ймовірностей переходів між станами.

Актуальність дослідження полягає в тому, що запропоновані підходи дозволяють підвищити ефективність використання спектра, зменшити інтерференцію та забезпечити стабільну роботу когнітивних мереж у складних динамічних умовах. Це відкриває нові можливості для впровадження когнітивних радіомереж у сучасні комунікаційні системи, включаючи мережі 5G та IoT.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні [1] розглядаються методи моніторингу частотного спектру для підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем. Автор пропонує гібридні методи спектрального моніторингу, які забезпечують ефективну ідентифікацію вільних частотних смуг та підвищення завадостійкості. Перевагою роботи є детальний аналіз адаптивних алгоритмів, здатних функціонувати в умовах складного радіосередовища. Недоліком можна вважати обмежену кількість експериментальних даних для підтвердження ефективності запропонованих методів.

У роботі [2] досліджено моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром у когнітивних радіомережах. Робота акцентує увагу на динамічному доступі до радіосередовища та ефективному використанні радіочастотного ресурсу.

Перевагою є розробка імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею з можливістю гнучкого налаштування параметрів.

Аналіз літератури показує, що книги після 2020 року охоплюють широкий спектр сучасних підходів до управління спектром та технологій когнітивного радіо, але мають різні фокуси. Наприклад, у роботі [3] детально розглядаються програмні технології в інфокомунікаційних системах, що забезпечує практичну спрямованість, однак обмежує аналіз специфічних алгоритмів когнітивного радіо. Книга [4] зосереджується на механізмах динамічного вибору спектра, пропонує глибокий теоретичний аналіз, хоча обсяг видання обмежує практичну деталізацію.

Інші джерела, такі як роботи [5–7], акцентують увагу на специфічних аспектах, як-от захист відє-озображень або криптографічні алгоритми, що є важливими для безпеки систем, але не повністю охоплюють тему управління спектром. Робота [6] пропонує сучасні підходи до управління військовими мережами, які можуть частково застосовуватися в цивільних когнітивних мережах, але обмежений обсяг знижує глибину дослідження. Загалом, хоча перевагами цих джерел є актуальність і інноваційність, більшість з них потребують більш глибокого охоплення специфіки когнітивного радіо та детальніших практичних досліджень.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка та дослідження математичних моделей і алгоритмів навчання для забезпечення динамічного доступу до спектра в децентралізованих когнітивних радіомережах. Особлива увага приділяється поєднанню Марковських процесів прийняття рішень (MDP) із алгоритмами навчання підкріплення, зокрема Q-learning, для адаптивного управління спектральними ресурсами в умовах невизначеності.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі основні задачі:

- аналіз особливостей динамічного доступу до спектра в когнітивних радіомережах, зокрема децентралізованих моделей;
- формалізація задачі управління спектром у вигляді Марковського процесу прийняття рішень;
- розробка алгоритму на основі Q-learning для навчання оптимальних стратегій доступу до спектра в умовах змінного середовища;
- проведення моделювання запропонованого підходу та аналіз його ефективності у порівнянні з традиційними методами;

– оцінка впливу ключових параметрів алгоритму, таких як швидкість навчання та коефіцієнт дисконтування, на якість прийняття рішень.

Результати дослідження спрямовані на підвищення ефективності використання радіочастотного спектра, мінімізацію інтерференції та покращення продуктивності когнітивних мереж у динамічних умовах.

Виклад основного матеріалу. Формалізація марковської моделі децентралізованого динамічного доступу до спектра.

Введемо систему когнітивної радіомережі з декількома вторинними користувачами (*Secondary Users*, SU), які прагнуть використовувати спектральні ресурси, що належать первинним користувачам (*Primary Users*, PU). Доступ до спектра відбувається в децентралізованому режимі, де кожен SU приймає рішення на основі локальної інформації.

Позначимо S_t – стан системи, який приймає значення: $S_t = 0$, якщо канал зайнятий первинним користувачем PU, та $S_t = 1$, якщо канал вільний і може бути використаний вторинним користувачем SU.

$$S_t \in \{0, 1\},$$

де t – дискретний час.

У свою чергу дії вторинного користувача A_t приймають значення: $A_t = 0$ – не використовувати канал, $A_t = 1$ – використовувати канал.

$$A_t \in \{0, 1\}.$$

Введемо перехідні ймовірності системи. Канал переходить між станами «зайнятий» і «вільний» за ймовірностями: $P(S_{t+1}=1|S_t=0) = p_{01}$ – ймовірність, що канал стане вільним; $P(S_{t+1}=0|S_t=0) = p_{00}$ – ймовірність, що канал стане зайнятим.

$$P(S_{t+1}|S_t) = \begin{cases} p_{01}, & \text{якщо } S_t = 0 \text{ і } S_{t+1} = 1; \\ p_{10}, & \text{якщо } S_t = 1 \text{ і } S_{t+1} = 0; \\ 1 - p_{01}, & \text{якщо } S_t = 0 \text{ і } S_{t+1} = 0; \\ 1 - p_{10}, & \text{якщо } S_t = 1 \text{ і } S_{t+1} = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Якщо вторинний користувач використовує вільний канал ($S_t = 1$, $A_t = 1$), він отримує нагороду $R = +1$, а якщо користувач використовує зайнятий канал ($S_t = 0$, $A_t = 1$), він отримує штраф $R = -1$ (через створення інтерференції).

$$R(S_t, A_t) = \begin{cases} +1, & \text{якщо } S_t = 1 \text{ і } A_t = 1; \\ -1, & \text{якщо } S_t = 0 \text{ і } A_t = 1; \\ 0, & \text{якщо } A_t = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Вторинний користувач прагне максимізувати суму нагород, тому цільова функція має вигляд

$$G = E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(S_t, A_t) \right], \quad (3)$$

де γ – коефіцієнт дисконтування $0 < \gamma \leq 1$.

Алгоритм роботи децентралізованого вузла.

Оцінка стану спектра: Вторинний користувач виконує *spectrum sensing*, щоб визначити поточний стан S_t .

1) прийняття рішення: на основі поточного стану S_t та політики $\pi(S_t)$, користувач вирішує, чи використовувати спектр ($A_t = 1$) чи ні ($A_t = 0$). Тут політика $\pi(S_t)$ – це ймовірність обрання дії A_t у стані S_t .

$$A_t = \arg \max_A Q(S_t, A), \quad (4)$$

(жадібна стратегія);

2) перехід до наступного стану S_{t+1} : Стан спектра змінюється за Марковським процесом на основі ймовірностей переходу $P(S_{t+1}|S_t)$;

3) отримання нагороди $R(S_t, A_t)$: Вузол отримує зворотній зв'язок (виграш чи штраф) залежно від успішності використання спектра;

4) оновлення стратегії: використовуючи алгоритм *Q-learning* (або інші методи підкріплення), вузол оновлює свої оцінки нагороди.

$$Q(S_t, A_t) \leftarrow Q(S_t, A_t) + \alpha \left[R + \gamma \max_{A_{t+1}} Q(S_{t+1}, A_{t+1}) - Q(S_t, A_t) \right], \quad (5)$$

де α – швидкість навчання;

5) перехід до наступного стану: система переходить у новий стан S_{t+1} за ймовірностями $P(S_{t+1}|S_t)$, і процес повторюється.

Проведення моделювання запропонованого підходу.

У якості вхідних параметрів моделі задамо ймовірності переходів:

$$P(S_{t+1}=1|S_t=0) = 0.6,$$

$$P(S_{t+1}=0|S_t=1) = 0.4.$$

Початковий стан спектра визначимо як «вільний», тобто $S_0 = 1$.

Розпочнемо симуляцію симуляція циклу *Q-learning*:

- 1) вузол визначає $S_t = 1$ (вільний);
- 2) вибирає дію $A_t = 1$ (використати спектр);
- 3) отримує нагороду $R = +1$;
- 4) перехід до $S_{t+1} = 0$ (зайнятий);
- 5) оновлює Q-таблицю для пари $(S_t = 1, A_t = 1)$.

Після декількох ітерацій вузол «навчається», що дія $A_t = 1$ є доцільною лише в стані $S_t = 1$ (вільний спектр), а в іншому випадку слід уникати використання спектра.

Ця інтеграція Марковських процесів із алгоритмами навчання дає вузлам когнітивної мережі можливість адаптуватися до реальних умов, навіть якщо ймовірності переходів або середовище змінюються з часом.

Аналіз ефективності у порівнянні з традиційними методами.

Для оцінки ефективності запропонованого підходу на основі алгоритму Q-learning було виконано моделювання в умовах динамічного середовища когнітивної радіомережі. Система включала кілька вторинних користувачів, які адаптували свою поведінку відповідно до стану спектра. Результати показали, що запропонований підхід забезпечує більш високу ефективність використання спектра у всіх проаналізованих сценаріях (низький, середній та високий рівні шуму) у порівнянні з традиційними методами, які не враховують адаптивне навчання.

Умови середовища включали випадкові переходи спектра між станами «зайнятий» та «вільний». Порівняння виконувалося за показниками, такими як загальна пропускна здатність та рівень конфліктів між вторинними користувачами. Запропонований підхід продемонстрував перевагу завдяки здатності динамічно адаптувати дії користувачів на основі історичних даних і зворотного зв'язку, що дозволило знизити рівень інтерференції.

Графік (рис. 1) показує порівняння ефективності запропонованого підходу Q-learning та традиційного методу.

Оцінка впливу ключових параметрів.

Для аналізу впливу ключових параметрів алгоритму було виконано серію експериментів із варіацією швидкості навчання α та коефіцієнта дисконтування γ . Результати показали, що збільшення швидкості навчання сприяє швидшому засвоєнню оптимальних стратегій, однак при занадто високих значеннях $\alpha > 0.4$ виникає ризик нестабільності в прийнятті рішень. Це свідчить про необхідність вибору помірної значення α яке балансує швидкість і точність навчання.

Коефіцієнт дисконтування γ визначає значущість майбутніх нагород у прийнятті рішень. Аналіз показав, що значення γ близьке до 1 (наприклад, 0.95–1.0) забезпечує кращу якість стратегій у довгостроковій перспективі, але може призводити до менш ефективної реакції на короткочасні зміни середовища. Натомість менші значення γ покращують адаптивність алгоритму до локальних змін, що особливо важливо в умовах високої динаміки середовища.

Ці результати підкреслюють важливість правильного налаштування параметрів алгоритму, що дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю адаптації, стабільністю і довгостроковою ефективністю.

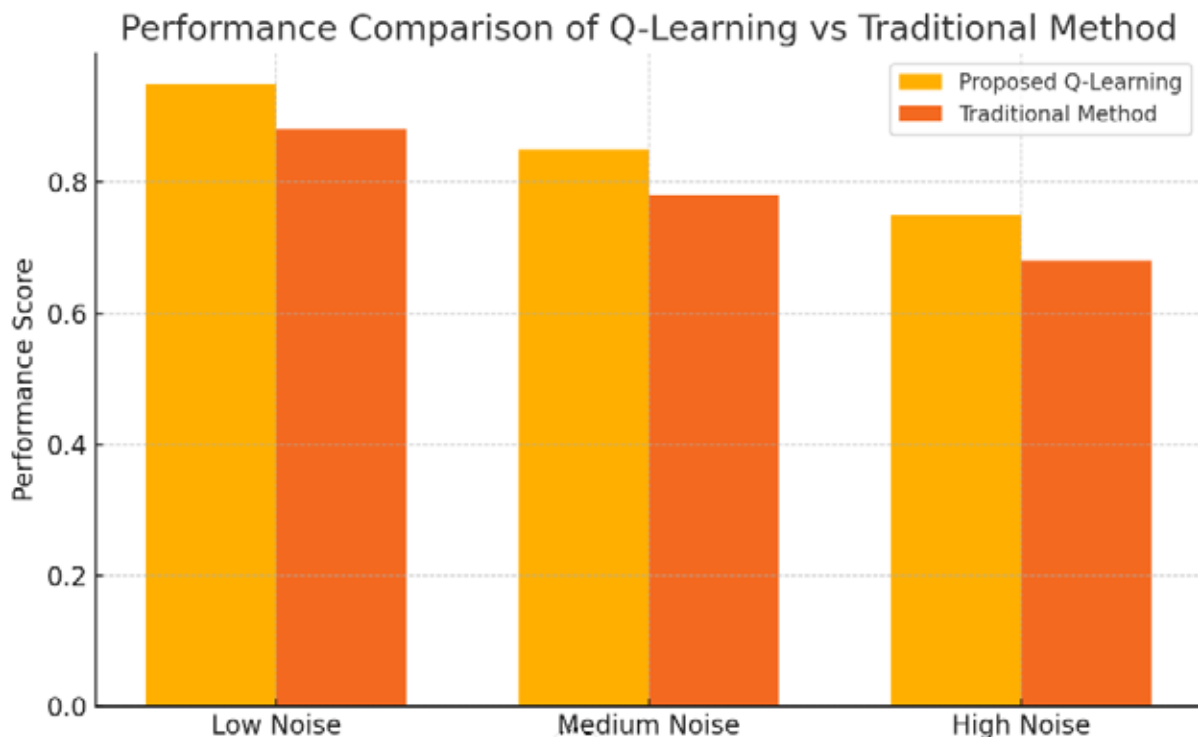


Рис. 1. Графік порівняння ефективності запропонованого підходу Q-learning та традиційного методу

Таблиця 1

Вплив швидкості навчання та коефіцієнта дисконтування

	DF=0.80	DF=0.85	DF=0.90	DF=0.95	DF=1.00
LR=0.1	0.9813	0.8631	0.8618	0.8295	0.9242
LR=0.2	0.8574	0.9005	0.9500	0.9067	0.8791
LR=0.3	0.9592	0.9967	0.8237	0.9783	0.9815
LR=0.4	0.8935	0.8367	0.9049	0.8756	0.9407
LR=0.5	0.8529	0.9102	0.9038	0.8534	0.9485

Висновки. Запропонований підхід на основі Q-learning у поєднанні з Марковськими моделями показав високу ефективність у задачах динамічного доступу до спектра в децентралізованих когнітивних радіомережах. У порівнянні з традиційними методами, він забезпечує краще використання спектральних ресурсів та зменшення рівня інтерференції завдяки здатності адаптивно навчатися в умовах невизначеності.

Аналіз параметрів алгоритму показав, що швидкість навчання та коефіцієнт дисконтування мають істотний вплив на ефективність роботи системи. Оптимальний вибір цих параметрів дозволяє досягти балансу між швидкою адаптацією до змінного середовища та стабільністю у довгостроковій перспективі, що робить підхід придатним для впровадження в сучасні бездротові системи.

Список літератури:

1. Thakur P., Kumar A., Pandit S., Singh G., Satashia S. N. Spectrum mobility in cognitive radio network using spectrum prediction and monitoring techniques. *Physical Communication*. 2017. Vol. 24. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.phycom.2017.04.005
2. Miranda R. F., Barriquello C. H., Reguera V. A., Denardin G. W., Thomas D. H., Loose F., Amaral L. S. A review of cognitive hybrid radio frequency visible light communication systems for wireless sensor networks. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 18. Art. 7815. DOI: 10.3390/s23187815
3. Thakur P., Kumar A., Pandit S., Singh G., Satashia S. N. Performance improvement of cognitive radio network using spectrum prediction and monitoring techniques for spectrum mobility. *Proceedings of the 2016 4th International Conference on Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC)*. 2016. P. 679–684. DOI: 10.1109/PDGC.2016.7913208
4. Haykin S. Cognitive radio brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2005. Vol. 23. No. 2. P. 201–220. DOI: 10.1109/JSAC.2004.839380
5. Giral D., Hernández C., Rodríguez-Colina E. Spectrum decision-making in collaborative cognitive radio networks. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 19. Art. 6786. DOI: 10.3390/app10196786
6. Thakur P., Singh G. Power management for spectrum sharing in cognitive radio communication system a comprehensive survey. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2020. Vol. 34. No. 4. P. 407–461. DOI: 10.1080/09205071.2020.1716858
7. Kolyadenko Y., Mulyar B. Аналіз алгоритму розподілу частотно-часового ресурсу у мережі когнітивного радіо. *Проблеми телекомунікацій*. 2019. No. 2(25). С. 67–77. DOI: 10.30837/pt.2019.2.05

Savchenko M.V., Merkulenکو Yu.S. Q-LEARNING AND MARKOV OPTIMIZATION: ADAPTIVE APPROACHES TO SPECTRUM MANAGEMENT IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

The article considers the combination of Markov models and learning algorithms for solving problems of dynamic spectrum access in cognitive radio networks. Particular attention is paid to the decentralized approach, when decisions on the use of spectral resources are made by each node separately based on local information and adaptive learning. The basis for modeling is the Markov decision process (MDP), which describes the behavior of the system under conditions of random changes in spectrum availability.

The basis for modeling decision-making is the Markov decision process (MDP), which allows formalizing the behavior of agents in an environment with stochastic dynamics. The model takes into account the probability of transition between spectrum states (for example, “busy” or “free”) and the corresponding actions of cognitive network nodes that affect the further development of events. Thus, the MDP acts as a mathematical foundation for the implementation of learning algorithms that take into account the long-term consequences of actions.

The article analyzes in detail the mechanisms of interaction of Markov models with reinforcement learning algorithms, in particular Q-learning, which allows nodes to gradually improve their behavioral strategies through a trial and error process. Learning is carried out on the basis of the received “rewards” for the correct

use of the spectrum (for example, avoiding conflicts with primary users) and “penalties” for violations (for example, interference). Nodes use the Q-function to assess the value of actions in each state and gradually update it in order to approach the optimal policy.

The proposed methodology demonstrates effectiveness in the tasks of maximizing throughput and minimizing interference under conditions of limited spectral resources. The analysis shows that the use of learning algorithms based on Markov models allows achieving a balance between exploring new spectrum opportunities and exploiting existing resources. This opens up prospects for creating more autonomous and adaptive cognitive networks.

Key words: *cognitive radio networks, dynamic spectrum access, Q-learning, Markov decision process (MDP), adaptive spectrum management, interference, autonomous wireless networks, spectral resource optimization.*

Дата надходження статті: 17.07.2025

Дата прийняття статті: 25.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Сокол Г.В.Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Ковда Є.О.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНИХ ВУЗЛІВ НА МАС-РІВНІ

У статті розглянуто новий метод виявлення несанкціонованих вузлів у бездротових мережах на рівні управління доступом до середовища (МАС-рівень). Актуальність проблеми зумовлена поширеністю атак типу *spoofing*, *flooding* та МАС-імперсонування, які здатні порушити цілісність, конфіденційність та доступність мережевих ресурсів. Запропонований підхід ґрунтується на поведінковому аналізі активності мережевих вузлів із використанням баєсівських моделей та частинкової фільтрації. Метод дозволяє у реальному часі оцінювати ймовірність аномальної поведінки окремого вузла, адаптуватися до змін у мережевому середовищі та формувати профіль типового навантаження для подальшого виявлення відхилень.

Побудована математична модель враховує частоту звернень вузлів до середовища передачі та дозволяє використовувати апостеріорні оцінки для виявлення потенційно небезпечної активності. Особливу увагу приділено оптимізації системи на основі функції втрат, що враховує як хибнопозитивні, так і хибнонегативні спрацювання. Алгоритм передбачає формування гнучкого порогового значення для прийняття рішень, що дозволяє балансувати між чутливістю та точністю.

Імітаційне моделювання, проведене на прикладі 50 вузлів, засвідчило високу ефективність методу: точність класифікації склала 90 %, із незначним відсотком помилок. Метод не вимагає зовнішніх баз знань чи централізованого контролю, що забезпечує його сумісність із обмеженими обчислювальними ресурсами та практичну доцільність у середовищах IoT та Ad-Hoc мережах.

Таким чином, запропонований підхід демонструє високу надійність у виявленні несанкціонованих вузлів, гнучкість до змін мережевої топології та можливість інтеграції в існуючі бездротові протоколи зв'язку.

Ключові слова: бездротові мережі, МАС-рівень, несанкціонований доступ, аномалії мережевої активності, баєсівське моделювання, частинкова фільтрація, поведінковий аналіз, виявлення вузлів, інтернет речей, система виявлення вторгнень.

Постановка проблеми. У сучасних бездротових телекомунікаційних мережах рівень управління доступом до середовища (МАС-рівень) залишається одним із найбільш вразливих до зловмисних впливів. Атаки типу *spoofing*, *flooding* та МАС-імперсонування здатні серйозно порушити нормальне функціонування мережі, створити загрозу конфіденційності, цілісності та доступності інформації, а також знизити загальну продуктивність системи. Особливо небезпечною є поява несанкціонованих вузлів, які маскуються під легітимних користувачів і можуть непомітно здійснювати небажані або шкідливі дії.

У цьому контексті актуальним є завдання розробки методів виявлення таких вузлів на основі аналізу їхньої поведінки. Одним із перспективних підходів є використання математичних моделей, які дозволяють виявляти відхилення від типового профілю активності у межах МАС-рівня. У даній роботі запропоновано метод виявлення аномалій, що базується на поєднанні баєсівських моделей для оцінки ймовірності активності вузлів із методами стохастичної фільтрації, які забезпечують адаптивне оновлення оцінок у режимі реального часу. Такий підхід дозволяє реалізувати ефективну систему контролю безпеки, здатну виявляти

потенційно небезпечні вузли навіть за відсутності додаткових криптографічних механізмів або централізованого моніторингу.

Останні дослідження у сфері інформаційної безпеки показують зростаючий інтерес до поведінкових методів виявлення аномалій, які ґрунтуються на статистичному аналізі активності вузлів. Серед таких підходів особливої уваги заслуговують байєсівські моделі, що забезпечують гнучке представлення невизначеностей і дозволяють адаптуватися до нових умов на основі накопичених даних. У поєднанні з алгоритмами фільтрації, ці методи створюють передумови для побудови ефективних систем виявлення несанкціонованих дій без потреби у зовнішніх джерелах знань або централізованих базах шаблонів атак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях, присвячених виявленню несанкціонованих вузлів у бездротових мережах, активно розробляються різноманітні підходи з використанням засобів машинного навчання, статистичного аналізу, фільтрації та штучного інтелекту.

Застосування глибоких нейронних мереж для виявлення атак у бездротових сенсорних мережах демонструє високу точність класифікації та здатність до узагальнення нових типів аномалій [1]. Проте такі методи потребують великих обсягів навчальних даних і значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їх впровадження у пристрої з обмеженою енергією.

Алгоритми машинного навчання, зокрема дерева рішень, метод опорних векторів і випадкові ліси, активно застосовуються для класифікації мережевого трафіку та аномалій [2]. Їхньою перевагою є висока швидкість та гнучкість, однак результати сильно залежать від якості вибору ознак.

Наївні байєсівські класифікатори також використовуються для виявлення несанкціонованих вузлів завдяки своїй простоті та здатності працювати в режимі реального часу [3]. Їх головним обмеженням є припущення незалежності між ознаками, що не завжди справджується в реальних мережах.

Байєсівські мережі в поєднанні з фільтраційними методами, такими як частинковий фільтр або фільтр Калмана, дозволяють точно оцінювати поведінкові параметри вузлів на основі історичних та поточних спостережень [4]. Ці методи забезпечують адаптивність до змін, але вимагають точного математичного налаштування.

Методи цифрової обробки сигналів застосовуються для ідентифікації несанкціонованих пере-

давачів за фізичними характеристиками сигналу [5]. Такі рішення добре підходять для низькорівневого контролю, але чутливі до шумів і варіацій середовища.

Алгоритми кластеризації, наприклад, k-means або DBSCAN, використовуються для виявлення груп вузлів, які демонструють відхилену поведінку [6]. Вони дозволяють виявляти аномалії без потреби мати навчальні зразки, однак їх ефективність залежить від гіперпараметрів та вибору відстаней.

Рекурентні нейронні мережі застосовуються для аналізу послідовностей активності вузлів у часі, дозволяючи виявляти довготривалі залежності [7]. Основним обмеженням є складність та ресурсоемність навчання.

Методи підкріплювального навчання дозволяють системам з досвідом вдосконалювати стратегії виявлення шляхом самонавчання на основі нагород і штрафів [8]. Цей підхід є перспективним, однак потребує великої кількості ітерацій для досягнення прийнятної рівня продуктивності.

Інтеграція статистичних методів із класичними алгоритмами машинного навчання забезпечує компроміс між інтерпретованістю та ефективністю виявлення [9]. Такі моделі краще піддаються аналізу, однак не завжди досягають точності глибокого навчання.

Гібридні підходи, які поєднують сигнатурний аналіз та виявлення аномалій, дозволяють водночас виявляти відомі атаки та адаптуватися до нових загроз [10]. Їх головним недоліком є висока складність реалізації та інтеграції різних модулів.

У роботі [11] досліджено методи виявлення вторгнень у бездротових сенсорних мережах. Автори запропонували розподілену систему виявлення (DIDS), яка використовує характеристики мережевої активності (могутність сигналу, аномалії в буфері приймача, сліди пакетів тощо) для фіксації атак типу flooding і spoofing. Модель перевірено у симуляторі OPNET, що показало високу ефективність протидії DoS-атакам. Перевагою є динамічна адаптація до змін мережевого середовища, однак реалізація вимагає глибокого доступу до параметрів обладнання.

У публікації [12] розглянуто загальні принципи побудови превентивних і реактивних систем безпеки для традиційних та Ad-Hoc мереж. У роботі ідентифіковано вразливості на рівні багатокрокової маршрутизації, наведено класифікацію атак, запропоновано підходи до побудови систем раннього виявлення. Основна перевага – міжмережевий підхід, недолік – відсутність формальної моделі виявлення.

У статті [13] зроблено акцент на сучасних методах аутентифікації в бездротових мережах. Проаналізовано математичні та метрологічні основи надійності засобів ідентифікації, їх вплив на загальну безвідмовність телекомунікаційної системи. Робота цінна з погляду нормативної точності, але не орієнтована на динамічні мережі чи мобільні вузли.

Загалом, аналіз опрацьованих джерел свідчить про різноманіття підходів до виявлення несанкціонованих вузлів, що базуються як на класичних статистичних методах, так і на сучасних технологіях штучного інтелекту, з перспективами подальшої інтеграції в реальні мережеві системи.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка і дослідження методу виявлення несанкціонованих вузлів у бездротових мережах на основі аналізу динаміки активності на МАС-рівні. Основна увага зосереджена на побудові математичної моделі, що дозволяє формувати поведінковий профіль кожного вузла, оцінювати ступінь відхилення поточної поведінки від очікуваної та виявляти аномалії із заданою чутливістю. Для реалізації поставленої мети у роботі використано баєсівський підхід до моделювання активності, методи частинкової фільтрації для онлайн-оцінювання параметрів, а також формалізовано критерії ухвалення рішень у вигляді функції втрат із ваговими коефіцієнтами для контролю хибних спрацювань.

Виклад основного матеріалу. *Математична модель поведінки вузлів.*

Для виявлення несанкціонованої або аномальної активності на рівні МАС необхідно побудувати математичну модель нормальної поведінки вузлів у мережі. Така модель має враховувати, як часто кожен вузол звертається до середовища передачі даних, тобто ініціює доступ або здійснює передачу інформації.

Для формалізації активності вузлів введемо наступні позначення. Нехай N – загальна кількість вузлів у мережі. Тоді $x_i(t)$ – показник активності вузла i у момент часу t , де: $x_i(t) = 1$, якщо вузол передає або намагається передати дані, $x_i(t) = 0$, якщо вузол неактивний у цей момент. У свою чергу вектор стану мережі у момент часу t , який описує активність усіх вузлів мережі, має вигляд

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t)]. \quad (1)$$

Для моделювання ймовірнісної поведінки окремого вузла використовується біноміальна

модель, що є окремим випадком баєсівської мережі. Вона дозволяє описати, з якою ймовірністю вузол буде активним у певний момент часу. Така модель виглядає наступним чином:

$$P(x_i(t)\theta_i) = \theta_i^{x_i(t)} (1 - \theta_i)^{1-x_i(t)}, \quad (2)$$

де: $\theta_i \in [0,1]$ – параметр, який описує ймовірність того, що вузол i буде активним у довільний момент часу, $x_i(t)$ – фактичний стан активності вузла у час t .

Сутність наведеної формули (2) полягає в тому, що якщо $x_i(t) = 1$, тобто вузол у даний момент часу є активним, то ймовірність цієї події дорівнює θ_i . Натомість, якщо $x_i(t) = 0$, тобто вузол не проявляє жодної активності, ймовірність такої події становить $1 - \theta_i$. Таким чином, поведінку кожного вузла можна повністю охарактеризувати одним параметром θ_i , який описує середню частоту його активності у мережі.

Оскільки параметр θ_i зазвичай невідомий наперед, його можна оцінити на основі зібраної історії спостережень за певний проміжок часу T . Для цього застосовується метод максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood Estimation):

$$\hat{\theta}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_i(t). \quad (3)$$

Іншими словами, $\hat{\theta}_i$ – це середня частота активності вузла i протягом останніх T моментів часу. Такий підхід дозволяє сформувати профіль «нормальної» поведінки кожного вузла на основі реального трафіку, що спостерігається в мережі.

Таким чином було сформульовано основу для подальшого аналізу аномалій: якщо поведінка вузла починає суттєво відрізнятися від оціненого параметра $\hat{\theta}_i$, це може вказувати на спробу несанкціонованого доступу або атаки на МАС-рівні.

Аномалія як відхилення від апостеріорної ймовірності.

Одним із ключових етапів у процесі виявлення несанкціонованих або аномальних вузлів є аналіз їхньої поведінки в динаміці, зокрема оцінка того, наскільки поточна активність відхиляється від типового профілю. Для цього використовується баєсівський підхід, що дозволяє уточнювати ймовірність активності вузла з урахуванням нових спостережень.

Апостеріорна ймовірність параметра активності θ_i при наявній історії спостережень за вузлом $x_i^{1:t}$ обчислюється за формулою:

$$P(\theta_i | x_i^{1:t}) = \frac{P(x_i^{1:t} | \theta_i) \cdot P(\theta_i)}{P(x_i^{1:t})}. \quad (4)$$

У цій формулі $x_i^{1:t}$ позначає послідовність значень активності вузла i від початкового моменту часу до моменту t , $P(\theta_i)$ – апіорне припущення про параметр активності, а $P(x_i^{1:t} | \theta_i)$ – ймовірність отриманої історії за умови фіксованого значення параметра θ_i . Знаменник $P(x_i^{1:t})$ виконує роль нормалізаційної константи, що гарантує коректність результату з точки зору ймовірнісного простору.

Аномальна поведінка вузла визначається як суттєве відхилення його апостеріорної оцінки $P(\theta_i | x_i^{1:t})$ від усередненої оцінки $\hat{\theta}_i$, яка була отримана на основі історичних спостережень. У випадку, коли модуль різниці між цими двома оцінками перевищує певне граничне значення ε , тобто:

$$|P(\theta_i | x_i^{1:t}) - \hat{\theta}_i| > \varepsilon, \quad (5)$$

вузол вважається підозрілим і таким, що потенційно демонструє аномальну або несанкціоновану активність. Цей підхід дозволяє формально і кількісно виявляти відхилення від очікуваної поведінки, не потребуючи жорстких правил або порогів, які могли б бути неефективними у змінних умовах мережі.

Модель фільтрації.

Для забезпечення високої точності оцінювання динамічної активності вузлів у реальному часі доцільно використовувати стохастичні методи фільтрації. У рамках цієї роботи запропоновано застосування алгоритму частинкової фільтрації (англ. Particle Filter), який є ефективним інструментом для наближеної баєсівської оцінки у випадках, коли аналітичне обчислення апостеріорної ймовірності є складним або неможливим.

Суть частинкової фільтрації полягає в апроксимації функції розподілу ймовірностей за допомогою скінченної множини випадкових зразків, або так званих частинок. Кожна частинка представляє можливе значення оцінюваного параметра – у нашому випадку це параметр активності вузла $\theta_i(t)$. Для початку роботи алгоритму виконується ініціалізація множини частинок: випадковим чином генеруються M значень $\theta_i^{(1)}, \theta_i^{(2)}, \dots, \theta_i^{(M)}$, які задають початкову апроксимацію розподілу.

Далі, для кожної частинки обчислюється вага, яка відображає правдоподібність поточного спостереження $x_i(t)$, за умови, що істинним є відповідне значення параметра активності. Ваги онов-

люються рекурсивно, з урахуванням попередньої ваги та ймовірності нового спостереження. Формально, оновлення ваги $w_i^{(j)}(t)$ для j -тої частинки на момент часу t описується виразом:

$$w_i^{(j)}(t) \propto P(x_i(t) | \theta_i^{(j)}(t-1)) \cdot w_i^{(j)}(t-1). \quad (6)$$

Цей підхід дозволяє адаптувати оцінювання параметра в режимі онлайн, оскільки з кожним новим спостереженням вага частинок перераховується відповідно до актуального стану вузла.

На основі оновлених ваг обчислюється поточна оцінка параметра активності $\hat{\theta}_i(t)$ як зважене середнє всіх частинок:

$$\hat{\theta}_i(t) = \sum_{j=1}^M w_i^{(j)}(t) \cdot \theta_i^{(j)}(t). \quad (7)$$

Це значення є найкращою доступною апроксимацією істинного параметра активності вузла з урахуванням усієї наявної інформації до моменту часу t .

Однак із часом розподіл ваг може ставати надто «розмитим» – більшість ваг стають близькими до нуля, тоді як кілька частинок мають непропорційно високі значення. Такий ефект називається дегенерацією вибірки й істотно знижує ефективність фільтрації. Для подолання цієї проблеми застосовується процедура ресемплінгу, під час якої виконується регенерація множини частинок відповідно до їхніх ваг. У результаті отримується нова вибірка, яка краще відображає поточний розподіл ймовірностей і дозволяє зберегти точність оцінювання в подальшому.

Таким чином, частинковий фільтр забезпечує гнучку та адаптивну модель оцінки динамічного параметра активності вузла, що є ключовим для вчасного виявлення аномальних змін у поведінці, характерних для несанкціонованого доступу на MAC-рівні.

Функція втрат і оптимізації.

Побудова ефективної системи виявлення несанкціонованих вузлів на MAC-рівні неможлива без чіткої математичної постановки задачі оптимізації. Основною метою є мінімізація загальної кількості помилкових рішень, які система може прийняти під час класифікації вузлів як нормальних або аномальних. У даному контексті враховуються два основні типи помилок: хибнопозитивні спрацювання (False Positives, FP), коли нормальний вузол помилково розпізнається як загрозливий, та хибнонегативні спрацювання (False Negatives, FN), коли аномальний або несанкціонований вузол залишається непоміченим.

Для кількісної оцінки загальних втрат у системі введено функцію втрат (loss function), яка дозволяє формалізувати компроміс між двома типами помилок. Функція має вигляд:

$$L = \alpha \cdot FP + \beta \cdot FN, \quad (8)$$

де параметри α та β є ваговими коефіцієнтами, що відображають відносну важливість кожного типу помилки. Наприклад, якщо в конкретному середовищі більш критичними є хибнонегативні рішення, які дозволяють атакуючим вузлам залишатися в мережі, то значення β має бути вищим за α . У випадках, коли хибнопозитивні рішення можуть призвести до зайвого виключення коректних пристроїв, перевага надається більшому значенню α .

Оптимізація системи виявлення аномалій полягає у виборі такого порогового значення μ , яке мінімізує значення функції втрат L . Тобто, необхідно знайти оптимальний компроміс між чутливістю та специфічністю системи. Залежно від складності моделі та характеру вхідних даних, для розв'язання цієї задачі можуть бути використані різні методи оптимізації, зокрема градієнтні методи, які дозволяють знаходити екстремуми диференційованих функцій, або байєсівська оптимізація, яка ефективна у випадках, коли функція втрат є неявною, нелінійною або має шум.

Таким чином, запропонований підхід до формалізації критеріїв якості виявлення дозволяє адаптувати систему до конкретних вимог користувача або середовища, забезпечуючи збалансовану роботу між точністю та надійністю.

Метод виявлення несанкціонованого вузла.

Побудований у роботі математичний апарат дозволяє сформулювати практичний метод

(рис. 1), який може бути реалізований у системах моніторингу та керування доступом на рівні МАС. Його призначення – виявляти вузли, чия поведінка суттєво відхиляється від очікуваної, і тим самим ідентифікувати потенційно несанкціоновані або шкідливі пристрої.

На першому етапі для кожного вузла в мережі ініціалізується індивідуальна байєсівська модель, яка враховує історію його активності та дозволяє сформувати початкову оцінку параметра ймовірності доступу до середовища – $\hat{\theta}_i$. Надалі, у процесі функціонування мережі, для кожного вузла в реальному часі обчислюється актуальне значення оціненого параметра активності $\theta_i(t)$, використовуючи метод частинкової фільтрації або інший відповідний інструмент.

Ключовим кроком у процесі виявлення є порівняння оцінки $\theta_i(t)$, з історичним середнім значенням $\hat{\theta}_i$.

$$D_i(t) = |P(\theta_i | x_i^{1:t}) - \hat{\theta}_i|. \quad (9)$$

Якщо величина $D_i(t)$ перевищує заздалегідь визначений поріг μ , вважається, що вузол демонструє аномальну активність, яка не відповідає його типовому профілю. У такому випадку фіксується інцидент потенційного порушення правил доступу до середовища.

З метою уникнення реакцій на поодинокі флуктуації або тимчасові збурення, алгоритм реалізує принцип накопичення підозрілих відхилень. Якщо відхилення $D_i(t) > \mu$ спостерігається у вузла багаторазово або із заданою частотою протягом контрольного інтервалу, такий вузол заноситься до умовного «чорного списку» як підозрюваний

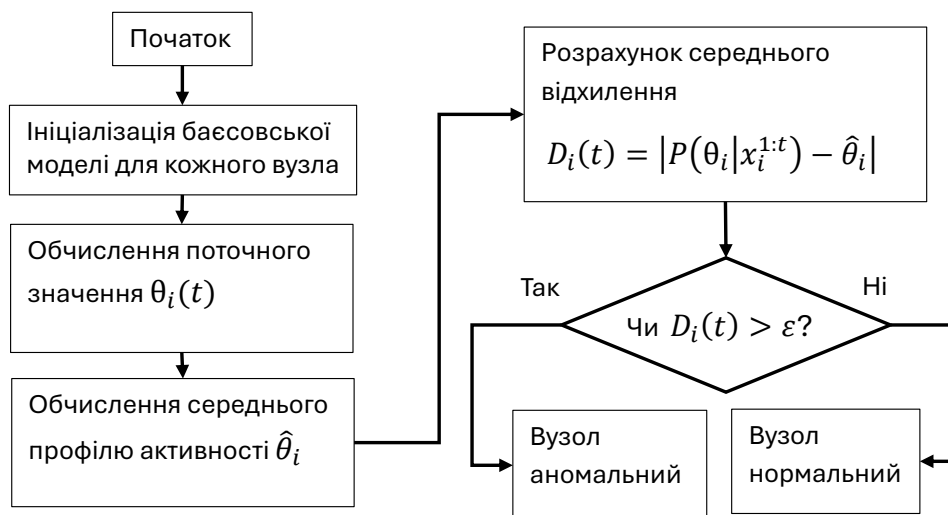


Рис. 1. Метод виявлення аномальних вузлів

у несанкціонованій поведінці. Надалі можлива ізоляція цього вузла, обмеження його доступу або подальше аналізування адміністраторами мережі.

Таким чином, запропонований алгоритм забезпечує не лише чутливе виявлення аномалій, а й враховує стійкість до хибнопозитивних реакцій завдяки механізму адаптивного порівняння і накопичення подій.

Експериментальні результати.

Для перевірки ефективності запропонованого методу виявлення несанкціонованих вузлів на рівні МАС було проведено імітаційний експеримент у середовищі, що моделює роботу бездротової мережі з 50 вузлами. У моделі передбачалося, що частина вузлів веде себе нормально, дотримуючись типової активності, у той час як деякі вузли імітують зловмисну поведінку через надмірну частоту доступу до середовища.

У рамках експериментального моделювання була розглянута мережа, яка складалася з 50 вузлів. Із загальної кількості пристроїв 10 % (тобто 5 вузлів) були змодельовані як атакуючі (таблиця 1). Їх поведінка характеризувалася високою частотою спроб доступу до середовища передачі – ймовір-

ність активності таких вузлів варіювалася в межах від 0.7 до 0.9. Решта 90 % вузлів (45 пристроїв) демонстрували нормальну мережеву поведінку, для якої характерна значно нижча інтенсивність взаємодії – ймовірність активності знаходилася у діапазоні від 0.1 до 0.3.

Тривалість спостереження за кожним вузлом становила 100 часових інтервалів, що дозволило сформулювати як історичні, так і поточні профілі активності. Для виявлення аномалій використовувалося поточне значення оціненого параметра активності $\theta_i(t)$, обчислене як середнє за останні 10 моментів часу. Критерій фіксації відхилення від нормальної поведінки був реалізований у вигляді порогової умови: якщо абсолютне відхилення поточного значення від історичного профілю перевищувало граничне значення $\mu = 0.25$, то така поведінка вважалася підозрілою.

У процесі моделювання для кожного вузла було проведено оцінку ключових параметрів, необхідних для подальшого аналізу його поведінки. Зокрема, розраховувалося середнє значення активності $\hat{\theta}_i$, яке характеризує загальну частоту звернень вузла до середовища доступу

Таблиця.1

Оцінка активності та класифікація вузлів

Вузол	Тип	θ	$\theta(t)$	Виявлено як	Вузол	Тип	θ	$\theta(t)$	Виявлено як
1	Атакуючий	0,84	0,9	Нормальний	26	Нормальний	0,21	0,2	Нормальний
2	Атакуючий	0,76	0,3	Аномальний	27	Нормальний	0,1	0	Нормальний
3	Атакуючий	0,85	1	Нормальний	28	Нормальний	0,21	0,2	Нормальний
4	Атакуючий	0,77	0,6	Нормальний	29	Нормальний	0,17	0,1	Нормальний
5	Атакуючий	0,65	0,8	Нормальний	30	Нормальний	0,18	0,1	Нормальний
6	Нормальний	0,12	0,1	Нормальний	31	Нормальний	0,21	0,3	Нормальний
7	Нормальний	0,26	0,3	Нормальний	32	Нормальний	0,1	0,1	Нормальний
8	Нормальний	0,25	0,2	Нормальний	33	Нормальний	0,17	0,1	Нормальний
9	Нормальний	0,19	0,3	Нормальний	34	Нормальний	0,25	0,3	Нормальний
10	Нормальний	0,14	0,2	Нормальний	35	Нормальний	0,1	0	Нормальний
11	Нормальний	0,19	0,1	Нормальний	36	Нормальний	0,21	0,2	Нормальний
12	Нормальний	0,13	0,1	Нормальний	37	Нормальний	0,13	0,2	Нормальний
13	Нормальний	0,22	0,4	Нормальний	38	Нормальний	0,12	0,1	Нормальний
14	Нормальний	0,24	0,4	Нормальний	39	Нормальний	0,27	0,2	Нормальний
15	Нормальний	0,21	0,2	Нормальний	40	Нормальний	0,27	0,2	Нормальний
16	Нормальний	0,09	0	Нормальний	41	Нормальний	0,23	0,3	Нормальний
17	Нормальний	0,27	0,4	Нормальний	42	Нормальний	0,12	0,2	Нормальний
18	Нормальний	0,28	0,2	Нормальний	43	Нормальний	0,12	0	Нормальний
19	Нормальний	0,1	0	Нормальний	44	Нормальний	0,19	0,4	Нормальний
20	Нормальний	0,12	0	Нормальний	45	Нормальний	0,12	0	Нормальний
21	Нормальний	0,16	0	Нормальний	46	Нормальний	0,15	0,1	Нормальний
22	Нормальний	0,18	0,2	Нормальний	47	Нормальний	0,2	0,2	Нормальний
23	Нормальний	0,15	0,1	Нормальний	48	Нормальний	0,12	0,3	Нормальний
24	Нормальний	0,17	0,1	Нормальний	49	Нормальний	0,32	0,6	Аномальний
25	Нормальний	0,21	0,1	Нормальний	50	Нормальний	0,13	0	Нормальний



Рис. 2. Порівняння середніх і поточних значень активності вузлів з порогом виявлення

протягом усього періоду спостереження. Одночасно із цим визначалося поточне значення параметра активності $\theta_i(t)$, обчислене як середнє за останні десять часових інтервалів. Це дозволяло виявляти короткотривалі, але значущі відхилення у поведінці вузлів.

Для кожного вузла також обчислювалося абсолютне відхилення $D_i(t) = |P(\theta_i | x_i^{1:t}) - \hat{\theta}_i|$, яке слугувало індикатором аномальності. Якщо значення цього відхилення перевищувало заздалегідь визначене порогове значення μ , поведінка вузла вважалася підозрілою.

Таким чином, механізм прийняття рішення базувався на оцінці динамічної узгодженості між поточним та історичним профілем активності кожного вузла.

Згідно з результатами експерименту, запропонований підхід продемонстрував високу ефективність. Загальна точність класифікації склала 90.0 %, що підтверджує здатність моделі до надійного розмежування нормальної та аномальної поведінки. Частка хибнопозитивних спрацювань становила 2.0 %: у цих випадках нормальні вузли були помилково ідентифіковані як аномальні. У той самий час частка хибнонегативних спрацювань склала 8.0 %, тобто деякі атакуючі вузли не були виявлені системою.

На рисунку нижче подано графік порівняння оцінених середніх значень активності вузлів $\hat{\theta}_i$ та їх поточних значень $\theta_i(t)$. Червона пунктирна лінія позначає порогове значення ε , що використовувалося для фіксації аномалії.

Отримані результати свідчать про збалансованість методу, який забезпечує високу точність при помірному рівні помилкових рішень. Завдяки

адаптивному механізму оцінювання активності, система демонструє хорошу чутливість до відхилень і водночас зберігає стійкість до випадкових флуктуацій у поведінці нормальних вузлів.

Наведені дані підтверджують, що метод виявлення на основі баєсівської моделі та оцінки активності дозволяє ефективно ідентифікувати зловмисну поведінку в мережі.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було розроблено ефективний метод виявлення несанкціонованих вузлів на MAC-рівні, який ґрунтується на аналізі відхилень у поведінці пристроїв без необхідності використання додаткового апаратного забезпечення. Запропонований підхід поєднує у собі баєсівське моделювання й адаптивну фільтрацію, що дозволяє здійснювати динамічну оцінку параметрів активності кожного вузла в реальному часі.

Гнучкість методу забезпечується завдяки здатності до самонавчання на основі історичних даних та оновлення оцінок при зміні мережевого середовища. Це робить запропоновану модель особливо корисною в умовах нестабільного трафіку або змінної топології. Крім того, обрані алгоритмічні рішення дозволяють забезпечити сумісність з широким спектром існуючих протоколів канального рівня, таких як IEEE 802.11 або IEEE 802.15.4, що відкриває можливості для практичного впровадження у бездротові мережі різного призначення – від локальних IoT-систем до великих корпоративних інфраструктур.

Таким чином, метод демонструє як високу ефективність виявлення, так і практичну доцільність у сучасних телекомунікаційних системах з обмеженими ресурсами.

Список літератури:

1. Imrana Y., Xiang Y., Ali L., Abdul Rauf Z. A bidirectional LSTM deep learning approach for intrusion detection. *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 185. Art. 115524. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115524
2. Aly M., Behiry M.H. Enhancing anomaly detection in IoT-driven factories using Logistic Boosting, Random Forest, and SVM: A comparative machine learning approach. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 23694. DOI: 10.1038/s41598-025-08436-x
3. Phatcharathada B., Srisuradetchai P. Randomized Feature and Bootstrapped Naive Bayes Classification. *Applied System Innovation*. 2025. Vol. 8, No. 4, Article 94. DOI: 10.3390/asi8040094
4. Ahmad R., Alkhamash E.H. Online adaptive Kalman filtering for real-time anomaly detection in wireless sensor networks. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 15: 5046. DOI: 10.3390/s24155046
5. Peng D., Xie K., Liu M. Application of Gray Wolf Particle Filter algorithm based on golden section in wireless sensor network mobile target tracking. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 13: 2440. DOI: 10.3390/electronics13132440
6. Retiti Diop Emame C, Song S, Lee H, Choi D, Lim J, Bok K, Yoo J. Anomaly Detection Based on GCNs and DBSCAN in a Large-Scale Graph. *Electronics*. 2024. 13(13):2625. DOI: 10.3390/electronics13132625
7. Almomani I., Al Kasasbeh B., Al Akhras M. WSN DS: a dataset for intrusion detection systems in wireless sensor networks. *Sensors*. 2016. Vol. 2016. No. 1. Art. 4731953. DOI: 10.1155/2016/4731953
8. Gueriani A., Kheddar H., Mazari A. C. Deep reinforcement learning for intrusion detection in IoT: a survey. *ArXiv preprint*. 2024. Art. arXiv:2405.20038. DOI: 10.48550/arXiv.2405.20038
9. Mathonsi T., van Zyl T.L. Statistics and deep learning-based hybrid model for interpretable anomaly detection. *Neural Comput. Appl.* 2022. Vol. 37. P. 707-721. DOI: 10.1007/s00521-021-06697-x
10. Mohite R., Ouarbya L. Interpretable anomaly detection: a hybrid approach using rule-based and machine learning techniques. *Proc. IEEE I2CT*. Pune, India, 2024, pp. 1-10, doi: 10.1109/I2CT61223.2024.10543396.
11. Mahjabin T., Xiao Y., Sun G., Jiang W. A survey of distributed denial of service attacks, prevention, and mitigation techniques. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2017. Vol. 13. No. 12. Art. 1550147717741463. DOI: 10.1177/1550147717741463
12. Alansari Z., Anuar N. B., Kamsin A., Belgaum M. R. A systematic review of routing attacks detection in wireless sensor networks. *PeerJ Computer Science*. 2022. Vol. 8. Art. e1135. DOI: 10.7717/peerj-cs.1135
13. Kwon D. K., Yu S. J., Lee J. Y., Son S. H., Park Y. H. WSN SLAP: secure and lightweight mutual authentication protocol for wireless sensor networks. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 3. Art. 936. DOI: 10.3390/s21030936

Sokol H.V., Kovda Ye.O. METHOD FOR DETECTION OF UNAUTHORIZED NODES AT THE MAS LEVEL

The article discusses a new method for detecting unauthorized nodes in wireless networks at the media access control (MAC) level. The relevance of the problem is due to the prevalence of attacks such as spoofing, flooding and MAC impersonation, which can violate the integrity, confidentiality and availability of network resources. The proposed approach is based on behavioral analysis of network node activity using Bayesian models and particle filtering. The method allows for real-time assessment of the probability of anomalous behavior of an individual node, adaptation to changes in the network environment and formation of a typical load profile for further detection of deviations. The constructed mathematical model takes into account the frequency of node access to the transmission medium and allows the use of a posteriori estimates to detect potentially dangerous activity. Special attention is paid to system optimization based on a loss function that takes into account both false positive and false negative responses. The algorithm involves the formation of a flexible threshold value for decision-making, which allows balancing between sensitivity and accuracy.

Simulation modeling, conducted on the example of 50 nodes, demonstrated the high efficiency of the method: the classification accuracy was 90%, with a small percentage of errors. The method does not require external knowledge bases or centralized control, which ensures its compatibility with limited computing resources and practical feasibility in IoT and Ad-Hoc network environments.

Thus, the proposed approach demonstrates high reliability in detecting unauthorized nodes, flexibility to changes in network topology and the possibility of integration into existing wireless communication protocols.

Key words: wireless networks, MAC layer, unauthorized access, network activity anomalies, Bayesian modeling, particle filtering, behavioral analysis, node detection, Internet of Things, intrusion detection system.

Дата надходження статті: 22.07.2025

Дата прийняття статті: 31.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Явіся В.С.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ШЛЯХИ ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОСТОРОВИМ ПОЛОЖЕННЯМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

У статті аналізуються методи управління орієнтацією та стабілізацією малих космічних апаратів (КА), що мають жорсткі обмеження за вагою та габаритами. Для цього проаналізовано два ключові підходи до інерційного управління: платформний та безплатформний. Платформні системи, засновані на гіростабілізованих платформах, виявилися непрактичними для малих КА через їхню велику вагу, розміри та чутливість до перевантажень. Відповідно, безплатформні інерційні системи (БІС) є алгоритмічним рішенням, де датчики жорстко закріплені на корпусі КА. Їх розвиток став можливим завдяки компактним обчислювальним засобам, що дозволило ефективно обчислювати параметри положення в реальному часі. Для математичного опису обертання в БІС використовуються матриці обертання, кути Ейлера та кватерніони.

На основі вимірюваних параметрів БІС класифікують на три типи, критично оцінюючи доцільність кожного. Система, що вимірює виключно лінійні прискорення, визнана непрактичною. Процес інтегрування для отримання кутового положення призводить до швидкого накопичення похибки, яка за лічені хвилини досягає неприйнятних значень. Таке заключення обґрунтовує необхідність використання датчиків, які вимірюють не лише лінійні, а й кутові параметри. Системи, що вимірюють лінійні прискорення та кутові швидкості, визначені як найбільш логічний і перспективний варіант. Вони забезпечують необхідну стійкість обчислювального процесу, запобігаючи швидкому дрейфу, характерному для систем, що базуються лише на інтегруванні прискорень. Системи, які вимірюють кути Ейлера за допомогою вільних гіроскопів, розглядаються як проміжний, гібридний варіант між платформними та безплатформними рішеннями, але вони мають обмеження щодо допустимих кутів та перевантажень.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що сучасні БІС, попри додаткові виклики, пов'язані з мінімізацією обчислювальних похибок, мають переваги над платформними системами завдяки вищій надійності, можливості використання точніших датчиків з меншим дрейфом та відповідності суворим вимогам щодо ваги та габаритів. З урахуванням цього, для створення системи стабілізації, яка ефективно працює з малими КА, найбільш виправданим є підхід, заснований на вимірюванні як лінійних прискорень, так і кутових швидкостей. Це рішення представляє оптимальний баланс між можливостями обчислювальної техніки та вимогами до точності управління.

Ключові слова: управління, безплатформна інерційна система, система орієнтації, система стабілізації, космічний апарат.

Постановка проблеми. При виведенні на орбіту для будь якого космічного апарату як правило одразу намагаються забезпечити його вірну орієнтацію. Однак, навіть при успішному вирішенні цього завдання, в наслідок впливу різного роду збурень, через незначний проміжок часу вже потрібно здійснювати корегування його орієнтації.

Для орієнтації та стабілізації просторового положення космічних апаратів використовують активні та пасивні методи [1].

Якщо місія космічного апарату не передбачає істотних змін його орбітального розташування, цілком достатнім буде застосування лише пасивних методів.

Однак практика показує, що забезпечити орієнтацію та стабілізацію не можливо без застосу-

вання активних методів, які передбачають використання двигунів-маховиків, систем моментного магнітоприводу, двигунів, що працюють за реактивним принципом [2, 3].

Вихідними даними для роботи систем орієнтації та стабілізації є інформація, яка зазвичай отримується від інерційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інерційні системи будуються на базі датчиків прискорень (акселерометрів), які дозволяють визначати зміну швидкості руху будь-якого тіла. Особливість роботи акселерометра полягає в тому, що за його допомогою можливо визначити лише проекцію прискорення точки тіла, де встановлений датчик, на власну вісь чутливості. Тому, якщо під впливом деякої сили відбувається прискорений рух об'єкту, і ця сила містить складову, яка виникла за рахунок сили тяжіння, акселерометр не спроможний визначити таку складову, оскільки сила тяжіння одночасно впливає як на нього, так і на сам об'єкт.

Отже, у випадку, коли рух об'єкту відбувається під впливом сили тяжіння, величина прискорення, яку визначає акселерометр, буде не співпадати з реальним значенням і тому одержало назву «уявне прискорення». Якщо виконати інтегрування навігаційного рівняння, на основі виміряного значення уявного прискорення можна знайти реальне положення об'єкту відносно центру тяжіння:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{dU}{dR} + a_k$$

де R – вектор розташування центру маси КА відносно центру тяжіння; a_k – вектор уявного прискорення центру маси КА; U – вектор-потенціал поля тяжіння.

Реалізація процесу управління передбачає наявність відомостей про значення складових вектору a_k , які є трьома ортогональними складовими, а отже, вимагає встановити у центрі маси КА три датчики таким чином, щоб їх вісі чутливості були розташовані взаємно перпендикулярно. Вісі чутливості датчиків потрібно орієнтувати по вісях вектору R . При такому підході вісі *вимірювальної системи* – це вісі чутливості акселерометрів, а базис від якого буде відраховуватись абсолютне значення прискорення – *інерційний координатний базис* – це вісі вектору R . Інерційні вісі КА, залежно від спрямованості вектору швидкості центру маси, обертаються навколо інерційного базису, тобто не співпадають з ним. Для реалізації *інерційного управління*, тобто управління шляхом

вимірювання уявних прискорень, можна використати два підходи: незалежно від руху КА поєднувати інерційний координатний базис з вісями вимірювальної системи; мати відомості про розташування вісей вимірювальної системи відносно інерційного базису впродовж кожного моменту часу. Впровадження другого підходу вимагає аби з вісей вимірювальної системи до вісей інерційного координатного базису відбулось перенесення складових вектору уявного прискорення [4].

В цьому випадку найбільш доречним буде сполучення вісей вимірювальної системи з вісями форми КА.

Отже, інерційне управління можна реалізувати двома шляхами. Перший передбачає використання пристроїв, які зберігають власне розташування щодо інерційного базису, тобто вони не обертаються одночасно з КА, і тому є основою для вимірювальної системи. Другий – перенесення компонентів прискорення, що вимірюються, на вісі інерційного базису, за рахунок використання пристроїв, які забезпечують обчислення параметрів для визначення кутів між вісями цього базису та вимірювальної системи.

Перший шлях може бути реалізований за допомогою приладів, які безпосередньо на КА створюють фізичну модель інерційного базису, тобто передбачає розташування на КА гіростабілізованої платформи. Другий шлях передбачає безплатформний підхід.

Безплатформні системи протягом досить тривалого періоду не знаходили практичного застосування внаслідок відсутності потужних обчислювальних засобів, які б були спроможними здійснювати у реальному масштабі часу обчислення складних рівнянь, які пов'язували між собою дві координатні системи. В той же час відбувався стрімкий розвиток платформ високої точності на базі гіроприладів.

На певному етапі розвитку реалізація систем на основі платформного підходу зіштовхнулась з необхідністю значного збільшення ваго-габаритних показників для забезпечення високої точності та надійності. Такі системи також є досить чутливими до значних перевантажень, які можуть виникати при експлуатації КА. В наш час стрімке збільшення потужності компактних обчислювальних засобів призвело до поширення саме безплатформних інерційних систем (БІС) у випадках, коли до систем управління висуваються жорсткі вимоги щодо ваги та габаритів [4, 5].

Постановка завдання. Безплатформні системи управління КА містять дві підсистеми: наві-

гаційну та стабілізацію. За допомогою першої знаходиться вихідне положення КА та програма переміщення в просторі. Підсистема стабілізації повинна сформувати сигнали управління для реалізації переміщення із заданою точністю. При впливі зовнішніх збурень та внаслідок зміни програми переміщення, можуть виникнути коливання КА. Їх зменшення – також завдання підсистеми стабілізації.

З точки зору застосування теорії автоматичного управління до підсистеми стабілізації, КА є об'єктом управління для якого вона повинна мати математичний опис траєкторії переміщення. Важливо вірно обґрунтувати обрання певного закону управління. Обрані для підсистеми стабілізації КА закони управління повинні забезпечити не лише задану точність та визначений характер перехідного процесу, а також і екстремальне значення деяких визначених критеріїв [4].

При реалізації платформних систем в якості вихідних даних для обчислення сигналів управління виступають кути між елементами інерційного координатного базису та вимірювальної підсистеми, які повинні бути реалізовані фізично. У системах стабілізації безплатформного типу (ССБТ) зв'язок між базисами інерційної та вимірювальної підсистем визначається шляхом обчислень з використанням набору параметрів, які напряду не можуть бути параметрами управління. Отже ССБТ повинні ґрунтуватися на методах, які дозволяють отримати параметри управління в результаті обчислення параметрів зв'язку інерційної та вимірювальної підсистем.

ССБТ мають дві особливості. Перша стосується математичного опису об'єкту управління – рівняння, які описують рух КА повинні містити як параметри, що вимірюються датчиками, так і параметри, які пов'язують інерційну та вимірювальну підсистеми. Друга особливість потребує створення методів, які дозволяють розробляти алгоритми, що є спроможними здійснювати обчислення в реальному масштабі часу параметрів, які зв'язують інерційну та вимірювальну підсистеми, з одночасним моніторингом помилок обчислень.

Розробка ССБТ повинна йти шляхом, який при обранні закону управління дозволяє застосувати відомі та добре розроблені методи управління. Отже потрібно обрати метод, що є спроможним обчислювати сигнали управління для систем, які забезпечують орієнтацію та стабілізацію КА.

Виклад основного матеріалу. Математичний апарат для опису ССБТ передбачає використання

інерційної, зв'язаної, зв'язаної програмної, вимірювальної та швидкісної систем координат [4].

Інерційна система координат – прямокутна система з правою орієнтацією, її початок розташовується у точці, з якої починається рух. В такій системі використовуються наступні позначення: початок системи координат O_{in} , вісі X_{in} , Y_{in} , Z_{in} . Всі вісі є статичними що до навколишнього глобального простору.

Зв'язана система координат – прямокутна система з правою орієнтацією, її початок розташовується у центрі маси КА. Вісі такої системи співпадають з вісями інерції. В такій системі використовуються наступні позначення: початок системи координат O , вісі X , Y , Z .

Зв'язана програмна система координат може бути визначена аналогічно до попередньої системи, але в ній використовується програмне положення вісей інерції. Використовуються наступні позначення: початок системи координат O , вісі X^* , Y^* , Z^* .

Вимірювальна система координат розглядається як копія зв'язаної, яка повернута відносно зміщеного центру. Її позначення: початок системи координат O_I , вісі x_I , y_I , z_I .

Швидкісна система координат – прямокутна система з правою орієнтацією, її початок розташовується у центрі маси КА. Вектор швидкості КА співпадає з однією віссю, якщо через цю вісь провести вертикальну площину, то друга вісь повинна перебувати в ній. Її позначення: початок системи координат O , вісі X_w , Y_w , Z_w .

Параметри кутового положення. Відносне кутове розташування систем координат ССБТ визначається через математичний лінійний оператор у вигляді квадратної матриці:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

Ця матриця має такі властивості:

$$\det A = 1, \quad A^T A = A A^T = E$$

Елементи матриці a_{ij} мають індекси, один з яких має відношення до вихідної системи, яка не обертається, інший відноситься до системи, яка є повернутою, він визначає номер певної вісі такої системи. Отже кутове положення однієї системи відносно іншої буде визначеним тоді, коли є заданими елементи матриці A .

Геометрична інтерпретація параметрів a_{ij} відповідає косинусам кутів, під якими розташовані вісі базисів, що розглядаються.

Елементи матриці A , які відображають зв'язок вимірювальної та інерційної систем позначимо

λ_{ij} , швидкісної та інерційної систем – μ_{ij} , а вимірювальної та швидкісної – μ_{ij}^* .

Для зв'язаної програмної системи елементи матриці A позначаються μ_{ij}^* та μ_{ij}^* .

Якщо врахувати позначення, які введені, можна записати наступний вираз:

$$\varepsilon = \lambda \mu^T \quad (1)$$

Через інші параметри обертання виражають напрямні косинуси a_{ij} . На практиці у ССБТ найбільш поширено застосовують кути Ейлера, які відображаються за допомогою трьох показників, та параметри Ейлера, які відображаються за допомогою чотирьох показників.

Кути Ейлера отримують наступним чином. Для певної прямокутної координатної системи, яка зображена на рис. 1, задають початкове положення $x_0 y_0 z_0$. Якщо здійснити три послідовні обертання, можна отримати нове положення такої системи, а саме:

- навколо вісі Z повернути на кут Ейлера θ ;
- позначити нове положення вісі Y через Y' та повернути навколо нього на кут Ейлера ψ ;
- повороту навколо останнє положення вісі X позначити через X'' та повернути навколо нього на кут Ейлера γ .

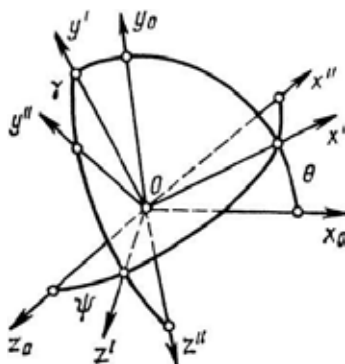


Рис. 1. Кути Ейлера

Для позитивних напрямків вісей обертання праворуч визначаються наступними матрицями:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}; \quad A_2 = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix};$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

В тривимірному просторі матрицю довільного обертання $A(\theta, \psi, \gamma)$ можна знайти як добуток

матриць A_i з урахуванням кількості можливих перекомпонувальних. Отже в подальшому будемо використовувати матрицю:

$$A(\theta, \psi, \gamma) = A_3(\theta) A_2(\psi) A_1(\gamma) \quad (3)$$

Введемо позначення кутів Ейлера між наступними системами:

- інерційна та вимірювальна – $\theta_1, \psi_1, \gamma_1$;
- інерційна та швидкісна – $\theta_c, \psi_c, \gamma_c$;
- швидкісна і вимірювальна – α, β, δ .

Кути в зв'язній програмній системі мають позначення:

$$\theta_1^*, \psi_1^*, \gamma_1^*, \alpha^*, \beta^*.$$

Параметри Ейлера геометрично визначаються за допомогою трьох напрямних косинусів, які відображають розташування певної вісі обертання відносно стаціонарного базису, а також кута повороту навколо цієї вісі системи, що може рухатися. Параметри Ейлера пов'язані з компонентами лінійного оператора a_{ij} такими виразами:

$$A = \cos e_4 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (1 - \cos e_4) \begin{pmatrix} e_1^2 & e_1 e_2 & e_1 e_3 \\ e_2 e_1 & e_2^2 & e_2 e_3 \\ e_3 e_1 & e_3 e_2 & e_3^2 \end{pmatrix} +$$

$$+ \sin e_4 \begin{pmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Теж саме в неявній формі

$$e_1 = \frac{a_{23} - a_{32}}{2 \sin e_4}; \quad e_2 = \frac{a_{31} - a_{13}}{2 \sin e_4};$$

$$e_3 = \frac{a_{12} - a_{21}}{2 \sin e_4}; \quad \cos e_4 = \frac{1}{2} [\text{Tr} A - 1],$$

$e_i (i = 1, 2, 3, 4)$ – параметри Ейлера.

Використання формул (4) для здійснення обертань через їх високий рівень складності не є раціональним. З практичної точки зору доцільно оперувати нормованими параметрами Ейлера-Родригеса $\varrho_i (i = 1, 2, 3, 4)$, які пов'язані з параметрами Ейлера наступним чином:

$$e_1 = \frac{\varrho_1}{\sqrt{1 - \varrho_4^2}}; \quad e_2 = \frac{\varrho_2}{\sqrt{1 - \varrho_4^2}}; \quad e_3 = \frac{\varrho_3}{\sqrt{1 - \varrho_4^2}};$$

$$e_4 = \arccos(2\varrho_4^2 - 1);$$

$$\varrho_1 = e_1 \sqrt{\frac{1 - \cos e_4}{2}}; \quad \varrho_2 = e_2 \sqrt{\frac{1 - \cos e_4}{2}};$$

$$\varrho_3 = e_3 \sqrt{\frac{1 - \cos e_4}{2}}; \quad \varrho_4 = \sqrt{\frac{1 + \cos e_4}{2}};$$

де застосоване співвідношення $\sum_{i=1}^{i=4} \varrho_i^2 = 1$.

Кватерніон ϱ можна записати так:

$$\varrho = \varrho_1 i + \varrho_2 j + \varrho_3 k + \varrho_4 = (\varrho_4 + i \varrho_1) + (\varrho_2 + i \varrho_3) j,$$

де ϱ_i – дійсні числа, а i, j, k – компоненти базису кватерніонів, для яких застосовуються наступні правила множення:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1; \quad ki = -ik = j; \quad jk = -kj = i;$$

$$ij = -ji = k.$$

Пов'язаний кватерніон можна записати $\varrho' = -\varrho_1 i - \varrho_2 j - \varrho_3 k + \varrho_4$,

Тоді одержимо:

$$|\varrho|^2 = \varrho' \varrho = \varrho \varrho' = \varrho_1^2 + \varrho_2^2 + \varrho_3^2 + \varrho_4^2 = 1;$$

$$\varrho^{-1} = \varrho'.$$

Напрямні косинуси λ_{ij} і параметри Ейлера-Родригеса ϱ_i мають наступний зв'язок:

$$\lambda_{11} = \varrho_1^2 - \varrho_2^2 - \varrho_3^2 + \varrho_4^2; \quad \lambda_{12} = 2(\varrho_1 \varrho_2 - \varrho_3 \varrho_4);$$

$$\lambda_{13} = 2(\varrho_1 \varrho_3 - \varrho_2 \varrho_4); \quad \lambda_{21} = 2(\varrho_1 \varrho_2 + \varrho_3 \varrho_4);$$

$$\lambda_{22} = -\varrho_1^2 + \varrho_2^2 - \varrho_3^2 + \varrho_4^2; \quad \lambda_{23} = 2(\varrho_2 \varrho_3 - \varrho_1 \varrho_4);$$

$$\lambda_{31} = 2(\varrho_1 \varrho_3 + \varrho_2 \varrho_4); \quad \lambda_{32} = 2(\varrho_2 \varrho_3 + \varrho_1 \varrho_4);$$

$$\lambda_{33} = -\varrho_1^2 - \varrho_2^2 + \varrho_3^2 + \varrho_4^2; \quad (5)$$

$$\varrho_1 = \frac{1}{2}(1 + \lambda_{11} - \lambda_{22} - \lambda_{33})^{\frac{1}{2}};$$

$$\varrho_2 = \frac{1}{2}(1 - \lambda_{11} + \lambda_{22} - \lambda_{33})^{\frac{1}{2}};$$

$$\varrho_3 = \frac{1}{2}(1 - \lambda_{11} - \lambda_{22} - \lambda_{33})^{\frac{1}{2}};$$

$$\varrho_4 = \frac{1}{2}(1 + \lambda_{11} + \lambda_{22} + \lambda_{33})^{\frac{1}{2}}.$$

Ортонормований кватерніонний базис при представленні векторів і обертань являє собою комплексні матриці (2×2) :

$$S_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad S_2 = \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix}; \quad S_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Алгебра кватерніонів для дійсних коефіцієнтів $h_k \equiv \varrho_i$ може бути отримана при таких правилах множення породжуючих:

$$S_1^2 = S_2^2 = S_3^2 = E; \quad S_1 S_3 = -S_3 S_1 = i S_2;$$

$$S_2 S_3 = -S_3 S_2 = -S_1; \quad S_1 S_2 = -S_2 S_1 = -i S_3.$$

При використанні комплексно-сполучених параметрів, які називають параметри Келі-Клейна, комплексні матриці стають ефективними в найбільшому ступені. Таки параметри відображаються за допомогою кутів Ейлера через наступну матрицю $A(\vartheta, \nu, \varphi) = A_3(\varphi) A_2(\nu) A_1(\vartheta)$:

$$A(\vartheta, \nu, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^*$$

$$* \begin{pmatrix} \cos \nu & 0 & \sin \nu \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \nu & 0 & \cos \nu \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & 0 \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Параметри Келі-Клейна формують матрицю (2×2)

$$U(\vartheta, \nu, \varphi) = \begin{pmatrix} a & b \\ -\bar{b} & \bar{a} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{де } a = e^{-\frac{\vartheta+\varphi}{2}} \cos \frac{\nu}{2}; \quad b = e^{i\frac{\vartheta-\varphi}{2}} \sin \frac{\nu}{2}; \quad |a|^2 + |b|^2 = 1$$

(a і b – параметри Келі-Клейна).

Отже, для визначення в просторі відносного кутового положення пари систем координат, достатньо аби були заданими набори параметрів, які описані [4].

Відомості щодо параметрів кутового руху КА можна одержати в формі прискорення точки, де встановлений вимірювальний прилад, або у вигляді інтегралу такого прискорення. Джерелом таких відомостей можуть бути різного роду датчики. Зауважимо, що на об'єкті, що рухається і який не пов'язаний з іншими тілами, є можливість вимірювання виключно прискорення. Решта величин, які вимірюються датчиками, визначаються інтегралами від прискорення. Тому при визначенні загального вигляду функціональної схеми ССБТ, залежно від того, які величини вимірюються, а які обчислюються, доречно її розділити на три варіанти:

– системи, в яких відбувається вимірювання виключно лінійних прискорень, а решта параметрів обраховуються;

– системи, в яких відбувається вимірювання лінійних параметрів та кутових швидкостей;

– системи, в яких відбувається вимірювання різномісних параметрів, в тому числі і кутів Ейлера.

Системи, в яких відбувається вимірювання лінійних прискорень, для обрахунку показників кутового розташування КА, використовують значення кутової швидкості по відношенню до інерційного базису. Вона задається проекціями

на вісі або інерційного базису або вимірювальної системи. Приріст кутової швидкості будь-якого об'єкту по відношенню до вісі обертання можна визначити наступним чином:

$$\omega_{ik} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{a_{1i} - a_{2i}}{l_i} dt$$

де ω_{ik} – зміна кутової швидкості впродовж проміжку часу $t_k - t_{k-1}$ по відношенню до i -ї вісі; l_i – відстань між двома різними точками, для яких вимірюється прискорення; a_{ji} – прискорення, що вимірюються в двох точках об'єкту.

В наслідок того, що l_i є постійною величиною, величина приросту кутової швидкості ω_{ik} буде пропорційно пов'язана з різницею значень, що видають вимірювачі прискорення з інтегральним виходом. Похибка масштабного коефіцієнта таких акселерометрів знаходиться в межах 0,001% [6]. За таких умов для $l_i = 1$ м за один крок обчислення похибка розрахунку кутової швидкості буде дорівнювати 10^{-4} c^{-1} . Це означає, що для кроку обчислення в 0,1 с, вже за декілька хвилин похибка досягне неприйнятних значень. Тому системи, в яких відбувається вимірювання виключно лінійних прискорень, не можуть бути застосовані.

Системи, в яких відбувається вимірювання лінійних параметрів та кутових швидкостей, мають певну особливість. Вона полягає в тому, що датчики, які призначені для вимірювання як лінійних прискорень так і кутових швидкостей, насправді надають можливість отримати відомості лише стосовно приросту інтегралів цих величин. Однак лінійні прискорення та кутові швидкості за фізичною сутністю є більш змістовними показниками. Для врахування зазначеної особливості можна використати два підходи.

При реалізації першого, конфігурацію математичного апарату здійснювати одночасно як для безпосереднього так і для інтегрального способів отримання відомостей від вимірювальної системи. Для другого – прийняти, що відомості стосовно параметрів руху можна отримати безпосередньо в їх розмірності, а майже інтегральні властивості для них врахувати при створенні чітко визначених алгоритмів конструювання інерційного координатного базису (ІКБ).

Для здійснення обрахунків параметрів переміщення КА потрібно мати відомості щодо вектору прискорення центру ваги КА, а також щодо вектору кутової швидкості обертання навколо центру ваги. Тому до складу системи вимірювання необхідно аби входило не менше трьох пристроїв

визначення лінійних прискорень та три вимірювачі кутової швидкості.

В системах, які передбачають вимірювання кутів Ейлера, їх визначення відбувається від інерційного базису, що передбачає його обов'язкове моделювання. В підсумку, для отримання складових вектору швидкості потрібно здійснювати перерахунок результатів, які отримані при використанні зв'язаної координатної системи, до ІКБ.

В таких системах складові a_{ij} матриці A можна знайти гуртуючись на безпосередньому вимірюванні кутів Ейлера. Обчислення складових a_{ij} матриці A можна здійснювати за допомогою виразів (2) та (3) за умови того, розташування вісей вимірювальної гіроскопічної системи здійснено так, що гіроскопічні кути співпадають з деякою сукупністю кутів Ейлера. У такій ситуації послідовність множення матриць A_i чітко залежить від початкової орієнтації вісей гіроскопічної системи. Отже, якщо початкове розташування вісей вимірювальної системи є таким, як це зображено на рис. 2, то можна отримати потрібні співвідношення шляхом використання матриці типу (3):

$$\theta_{1r} = \theta_1; \psi_{1r} = \psi_1; \gamma_{1r} = \gamma_1; \quad (8)$$

де для позначення гіроскопічних кутів використовується індекс «г». Основною перевагою цієї системи в порівнянні з попередніми є зменшення витрат на виконання обчислень, які здійснюються під час побудови інерційного базису. Водночас вагомим недоліком є обмеження щодо припустимих кутів повороту та перевантажень через наявність вільних гіроскопів у системі орієнтації КА. Система, яка працює з вимірюванням кутів Ейлера, може розглядатися як проміжний варіант між платформними та безплатформними системами. У разі наявності фізичних моделей інерційного базису на борту її можна класифікувати як звичайну інерційну систему, а за характером розташування акселерометрів – як безплатформну.

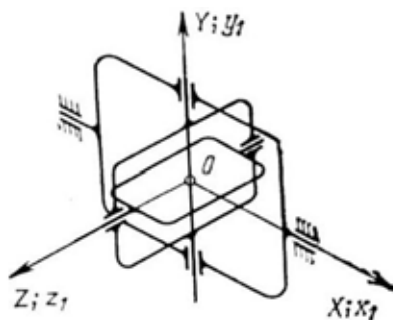


Рис. 2. Розташування вісей вимірювальної гіроскопічної системи

Розвиток інерційних систем управління зводить переваги безплатформних інерційних систем до мінімуму. У порівнянні з платформними системами, БІС забезпечують вищу надійність та можливість використовувати акселерометри більших розмірів і мас. Проте значним недоліком є потреба у потужному обчислювальному пристрої, що підвищує загальну похибку побудови інерційного базису.

Висновки. Виходячи з того, що відхилення сучасних гіроплатформ визначаються похибками датчиків кутової швидкості, можна стверджувати, що похибка обчислення кутового положення інерційного базису (у разі відсутності

обчислювальних помилок) відповідає рівню відхилення стабілізованих платформ. У БІС, окрім звичних для інерційних систем проблем зі зменшенням дрейфу, виникає задача мінімізації похибок обчислення під час аналітичної побудови базису. Хоча нові похибки обчислень є додатковим фактором, вони компенсуються значними можливостями щодо зменшення дрейфу завдяки використанню датчиків з більшою масою та габаритами.

Отже для створення системи стабілізації КА та для отримання керуючої інформації логічним є використання системи, яка вимірює лінійні прискорення та кутові швидкості.

Список літератури:

1. Ігнатенко В. В. Управління рухом і стабілізація супутників. Дніпро: ДНУ, 2017. 298 с.
2. Явіся В.С., Явіся Д.В. Аналіз способів отримання даних для систем керування положенням нано-супутника // Чотирнадцята міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій». Матеріали конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2020. – С. 285–288. ISSN (print) 2663-502X, ISSN (online) 2664-3057.
3. Monitoring System and Fixed Communication on the Basis of Nanosatellites. Lysenko, A., Yavisya, V., Alekseeva, I., Tureichuk, A. 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Proceedings, 2019, pp. 495–498, 8632097. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632097.
4. Гнатюк В. В. Системи стабілізації літальних апаратів на основі безплатформних інерційних навігаційних комплексів. Харків: ХАІ, 2020. 275 с.
5. Шмідт О. Ю. Системи стабілізації супутників: принципи побудови та функціонування. Львів: Видавництво ЛНУ, 2020. 270 с.
6. Коваленко І. П. Алгоритмічні методи зменшення похибок в інерціальних системах навігації. Дніпро: ДНУ, 2019. 280 с.

Yavisya V.S., Guida O.H. WAYS OF OBTAINING INFORMATION FOR SPATIAL POSITION CONTROL SYSTEMS OF SPACECRAFT

The article analyzes methods for controlling the orientation and stabilization of small spacecraft with strict weight and size limitations. To this end, two key approaches to inertial control are analyzed: platform-based and platform-free. Platform systems based on gyro-stabilized platforms have proven impractical for small spacecraft due to their heavy weight, size, and sensitivity to overload. Accordingly, platformless inertial systems are an algorithmic solution where sensors are rigidly fixed to the spacecraft body. Their development was made possible by compact computing devices, which allowed for the efficient calculation of position parameters in real time. Rotation matrices, Euler angles, and quaternions are used for the mathematical description of rotation in platformless inertial systems.

Based on the measured parameters, the authors classify platform-free inertial systems into three types, critically assessing the feasibility of each. A system that measures only linear acceleration is considered impractical. The integration process for obtaining the angular position leads to a rapid accumulation of error, which reaches unacceptable values in a matter of minutes. This conclusion justifies the need to use sensors that measure not only linear but also angular parameters. Systems that measure linear acceleration and angular velocity are considered the most logical and promising option. They provide the necessary stability of the calculation process, preventing the rapid drift characteristic of systems based solely on acceleration integration. Systems that measure Euler angles using free gyroscopes are considered an intermediate, hybrid option between platform and non-platform solutions, but they have limitations in terms of permissible angles and overloads.

In summary, it can be argued that modern platform-free inertial systems, despite the additional challenges associated with minimizing computational errors, have advantages over platform-based systems due to their higher reliability, the ability to use more accurate sensors with less drift, and compliance with strict weight and size requirements. With this in mind, the most justified approach to creating a stabilization

system that works effectively with small spacecraft is one based on measuring both linear accelerations and angular velocities. This solution represents the optimal balance between computing capabilities and control accuracy requirements.

Key words: *control, platform-free inertial system, orientation system, stabilization system, spacecraft.*

Дата надходження статті: 14.08.2025

Дата прийняття статті: 28.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 628.47

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/14>**Абдулін М.З.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Хмара П.П.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Шахбазов І.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЧИЩЕННЯ ВИХІДНИХ ГАЗІВ СМІТТЄСПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ В ТОПКАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОТЛІВ

У статті представлено огляд літератури щодо ефективності термічної переробки твердих побутових відходів, з наголошенням на екологічному аспекті зазначеного методу переробки, в топках енергетичних котлів.

В даний час, а також в минулому і майбутньому, завжди актуальна тема бережливого відношення до навколишнього середовища. Якщо зробити огляд основних економічних та соціальних проблем людства, можна побачити постійно існуючу проблему необхідності утилізації твердих побутових відходів (ТПВ). Програмними документами, включаючи державні стратегії розвитку, взято за мету знизити утворення забруднюючих речовин та передбачити можливість використання побутових відходів як альтернативного джерела енергії та ресурсів. До речі, виконавши це завдання, можна буде прискорити темпи переходу до високотехнологічних, максимально безвідходних моделей функціонування економіки. Маючи на увазі гостроту проблеми утилізації ТПВ, говориться про те, що в разі не вирішення її, існуватиме загроза критичного забруднення довкілля. Тому, вважаємо за необхідне зробити широкий аналіз технологій сміттєспалювання та очищення вихідних газів після спалювання. Починати треба з такого положення, що при роботі сміттєспалювальних заводів основною вимогою, що пред'являється до їх експлуатації, є жорсткий контроль за рівнем забруднення довкілля. При спалюванні сміття, серед продуктів згоряння, які потрапляють в атмосферу, значну частку займають дуже небезпечні речовини, такі як діоксини та фурани, концентрація яких в викидах залежить від температурного режиму, технологічного регламенту та складу спалюваних відходів. При проведенні огляду наявних в даний час технологій спалювання, з'ясовано, що утворення діоксинів і фуранів відбувається за відносно низьких температур (до 800°C). Нажаль, навіть сучасні системи газоочищення не в змозі забезпечити екологічної безпеки сміттєспалювання. В цій статті використана інформація із робіт, які описують методи переробки ТПВ, а також приділяється увага знешкодженню джерел утворення діоксинів термічним способом. Цю проблему не можливо вирішити без сучасних ефективних технологій спалювання.

Ключові слова: тверді побутові відходи, сміття, термообробка, спалювання, утилізація, діоксини, газоочистка, поновлювальні ресурси, екологічна безпека.

Постановка проблеми. В період за останніх 100 років суспільство більш ніж в 1000 разів збільшило споживання природних енергетичних

ресурсів, що призвело до збільшення кількості та різноманітності відходів. Весь цивілізований світ намагається зменшувати кількість відходів, яко-

мога повніше переробляти або використовувати їх, і вже на стадії планування нових товарів мати способи та шляхи їхньої утилізації.

Якщо прийняти той факт, що у теперішніх умовах господарювання великого значення набула проблема забруднення навколишнього середовища результатами життєдіяльності суспільства, то можна сформулювати одну з найважливіших екологічних, економічних, моральних та соціальних проблем людства – це проблема знешкодження твердих побутових відходів (ТПВ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні, задля зменшення забруднення навколишнього середовища і раціонального використання енергетичних ресурсів, розроблено Енергетичну стратегію на період до 2035 року [1], і в ній важлива роль відводиться охороні довкілля. Основними моментами в реалізації стратегічних цілей у цій сфері має бути завдання «створити систему стимулювання використання відходів як джерела енергії для виробництва теплової та електричної енергії».

Наявна Директива Європейського Союзу зумовлює критерії для охорони довкілля та здоров'я людини. Досягти цього планується за допомогою запобігання утворенню відходів, зменшення негативних наслідків від утворення відходів та їх подальшого знешкодження. Напрямок усунення, за можливістю, загальних наслідків використання природних ресурсів з подальшим підвищенням ефективності такого використання, вважається дуже важливим в процесі переходу до циркулярної економіки [2].

Проаналізувавши теперішній стан і тенденції розвитку практики утилізації в світі, можна побачити, що основними методами знешкодження є застосування термічної обробки ТПВ (в основному мова йде про спалювання). До переваг термічної переробки відноситься майже повне знешкодження відходів, в результаті чого утворюється сухий і відносно безпечний залишок (шлак чи пил), значне скорочення маси (у 3–6 разів) та об'єму (у 10–15 разів) залишку [3], якщо порівняти з початковим матеріалом. Застосовується також можливість використання відходів в якості джерела матеріальних ресурсів і енергії [3].

Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз останніх публікацій щодо висвітлення проблем термічних методів переробки сміття та інших відходів, з приділенням уваги технологіям, які дозволяють отримати корисну сировину або енергоресурс від спалювання сміття з мінімальним впливом на довкілля.

Для досягнення поставленої цілі, необхідно проаналізувати існуючі технології спалювання різних відходів у топках енергетичних котлів, та визначити найбільш перспективні для України технології термообробки відходів. Особливу увагу слід приділити ролі технологій спалювання, які дозволяють забезпечити необхідні екологічні нормативи при роботі обладнання, таким чином вирішивши проблему очищення вихідних газів.

Виклад основного матеріалу. На момент написання статті [3], в Україні й світі інтенсивно розвивались такі основні напрямки знешкодження маси твердих побутових відходів – спалювання на сміттєспалювальних заводах (ССЗ), або захоронення на звалищах (полігонах), також використовувався метод поховання з отриманням біогазу.

Спалювання ТПВ є саме по собі небезпечним технологічним процесом, який провокує виділення багатьох шкідливих речовин, знаних як діоксини, фурані, біфеніли, та інші забруднювачі, а також достатньо велика кількість пилу [4]. Із переліку продуктів, які виділяються при спалюванні, можемо сміливо сказати, що найбільш небезпечними є діоксини.

Діоксини – це дуже сильні канцерогени, які є небезпечними в будь-яких концентраціях. Крім онкологічних захворювань, вони можуть також викликати пригнічення імунітету, безпліддя, та вроджені патології. Діоксини розповсюджуються в верхньому шарі ґрунту, донних відкладеннях, воді, рибі, повітрі, овочах і т.д. Вони мають характеристики надзвичайно високої стійкості до хімічного та біологічного розкладання, а також є чинником довготривалого забруднення біосфери [5]. Одним з основних джерел утворення діоксинів з подальшим потраплянням їх у довкілля, є спалювання хлор-містких сполук, як приклад спалювання пластмас.

Високотемпературний піроліз можна назвати одним з найперспективніших методів переробки ТПВ, якщо мати на увазі екологічну безпеку, а також маючи завдання отримання вторинних цінних продуктів, таких як синтез-газ, шлаки, метали та інші матеріали, яким доцільно знайти пряме застосування на різних об'єктах економіки країни [6].

Наприклад, у Донецькій області було розроблено проект, який був направлений на впровадження системи «Створення відділень піролізу та когенерації на регіональному полігоні будівельних та промислових відходів із комплексом переробки ТПВ» [3]. В цьому проекті використовувався провідний зарубіжний досвід щодо пово-

дження з ТПВ, а також враховано особливості вітчизняних підприємств, які займаються спалюванням відходів.

Світовий досвід в галузі термічної переробки ТПВ, для зменшення утворення діоксинів та пониження їх концентрації у викидах в навколишнє середовище, застосовує складні системи газоочищення, які мають високий рівень капіталовкладень на їх застосування.

Принципова відмінність вищезгаданої технології від традиційно використовуваної технології піролізу у тому, що отриманий синтез-газ забирається від високотемпературної зони реактора. Процес спалювання відходів налаштований таким чином, що дозволяє додержуватись усіх встановлених нормативних вимог відносно знешкодження стійких органічних шкідливих речовин, у тому числі діоксинів, враховуючи тривалість термообробки (5–6 годин), та температурні режими [3].

Варто зазначити, що виникнення діоксинів не очікується саме за рахунок часових і термічних особливостей протікання процесу піролізу, а не властивостей обладнання [3]. Це дозволяє без появи небезпеки для екологічної ситуації суттєво знизити капітальні витрати у порівнянні із зарубіжними аналогами. Замкненість системи, малий займаний об'єм обладнання та висока екологічність дають можливості для розміщення підприємств такого типу у межах міст. Результатом процесу піролізу є те, що з однієї тони ТПВ виробляється близько 1200 кВт·год електроенергії та 250 кг шлаку. Шлак, який утворено в результаті спалювання ТПВ, якщо проаналізувати за хімічним складом, можна віднести до природного базальту та використовувати в якості будівельного матеріалу.

При спалюванні ТПВ в котлах ССЗ в першу чергу згорають органіка й полімери. Проте в разі вилучення цих компонентів із маси сміття, процес згорання такого сміття стає енергетично неефективним. До того ж, результатом сміттєспалювання є шлак та попіл, в об'ємі близько 30% початкової маси ТПВ. Як стверджують автори [7], наше законодавство намагається заохочувати використовувати дані матеріали в різних галузях будівельної та дорожньо-ремонтної промисловості. Проте з часом, основна більшість національних законодавств починає процес прирівнювання попілу та шлаку до небезпечних відходів, та вводить нові норми поховання з відповідними цінами.

При спалюванні ТПВ утворюється значна кількість енергії, яка може бути використана для отри-

мання теплоти опалення, технологічної пари та електроенергії. Схеми, які вирішують таку задачу, ефективно працюють у Китаї [8] та країнах Євро-союзу [9]. На даний час у нас, в Україні, ситуація, яка склалась, суттєво відрізняється в гіршу сторону від світових стандартів в технологічному плані. На сьогодні ми маємо деякі труднощі з експлуатацією ССЗ. Причиною цього є здорожчання газу, яким виконується теплова підсвітка при спалюванні ТПВ, газ починають економити, в результаті чого сміття не встигає пройти повного згорання, та не може бути доведеним до стану шлаку. В результаті, в продуктах спалювання на виході з ССЗ маємо обгоріле сміття в той час, коли бажали отримати попіл та шлак.

Єдиний наразі сміттєспалювальний завод в Україні – це завод «Енергія» [10]. На ньому в наш час утилізується близько 25% від загальної кількості сміття столиці нашої держави. Теплова енергія, яка утворюється в результаті спалювання відходів, забезпечує гарячим водопостачанням та опаленням близько 300 багатоповерхових будинків у районі «Позняки» міста Києва. Завод виробляє 200 тис. Гкал теплової енергії на рік, що замінює до 30 млн. м³ газу. На виході з сміттєспалювальних котлів встановлені електрофільтри, що збирають пил та шкідливі речовини димових газів. На момент написання статті [10] на цей завод планувалося встановити ще й систему хімічного очищення димових газів. Це повинно було б зменшити рівень шкідливих викидів у 5 разів. Будівництво такої системи передбачає декілька етапів і триватиме орієнтовно два роки за умови вчасного фінансування.

Згідно роботи [11] єдиним повністю надійним способом позбавлення відходів ССЗ від органічних забруднювачів можна назвати їх термічну обробку: спалювання, піроліз та газифікацію. Позитивним ефектом термообробки є знешкодження органічних складових сміття, проте, вона супроводжується виходом у димові гази солей важких металів та усіх інших токсинів. Цілком логічно, що виникає необхідність встановлювання дуже коштовних систем газоочистки, також необхідно вирішувати проблеми переробки золи, оскільки вона майже завжди містить недопалений вуглець.

Термічна утилізація відходів може бути моноспалювальною або передбачати сумісне спалювання, наприклад, з вугіллям чи газом. Вона налічує декілька визнаних технологій: моноспалювання у печах з киплячим шаром; спалювання у багатоподових печах; термічна деструкція

у циклонних та обертових печах; піроліз; газифікація. Сумісне спалювання відходів відбувається у топках енергетичних котлів з киплячим шаром, у факельних топках та у печах спалювання ТПВ [11].

Якщо говорити про конструкційні особливості спалювальних пристроїв, можна назвати обертові та багатоподові печі, та системи високотемпературного піролізу. Перевагою перших (обертових та багатоподових печей) є об'єднання в одному робочому просторі зон сушіння та горіння. Серед недоліків таких печей можна назвати нещільність, високу капітало- та енергоємність, швидку корозію елементів, а для багатоподових печей на додаток ще й нерівномірність температур в об'ємі речовини. На противагу вищезгаданим, печі з киплячим шаром забезпечують рівномірність температур у шарі, доволі низьку температуру горіння та відносно низькі значення викидів NO_x , CO , SO_2 , Cl , F , а також надійне вигорання з малими втратами. Однак дані технології киплячого шару мають відносно невисокий ККД перетворення отриманої теплової енергії відходів в електричну внаслідок своєї складності, в основному потребують ретельного догляду та вживання заходів для запобігання потрапляння габаритних включень у робочий простір.

Згадуючи про можливий вміст діоксинів та їх аналогів у викидах при спалюванні сміття, то він здебільшого має залежність від наявності в ТПВ спектру хлорорганічних речовин та хлорполімерів. Особливо тут треба нагадати про небезпечних попередників діоксинів, таких як поліхлорфеноли, поліхлорбензоли [12]. Склад продуктів згорання в викидах різних систем спалювання також має залежність від систем очищення, які застосовані на цих ССЗ.

Як стверджується авторами [13], найбільш ефективним при знешкодженні ТПВ на ССЗ є процес піролізу, оскільки він здійснюється високотемпературними реакторами за рівнем температур понад 1600°C при наявному дефіциті кисню, і при цьому не вимагає попередньої підготовки сміття. Належно високий рівень температури буде забезпечувати надійне руйнування фактично повного спектру складних органічних речовин, суцільне окислення їх до простіших горючих (горючий газ) або негорючих (шлак) сполук. Під час такого піролізу ТПВ процес викиду небезпечних шкідливих речовин у навколишнє середовище мінімальний, але реальна собівартість таких систем відносно висока.

Згідно з Нормативами [2], технологія перебування ТПВ в гарячій зоні камери спалювання має бути такою, щоб гарантовано забезпечити перебування продуктів згорання у зоні горіння з температурою, більшою за 850°C , і часом не менше 2 с (правило 2-х секунд). Концентрація кисню має бути не менше ніж 6 % (коефіцієнт надлишку повітря не менший за 1,4). Слід зазначити, що це складно досяжна вимога, якої важко дотримуватись постійно в процесі безперервної роботи ССЗ. Можемо побачити, що для постійного виконання цієї умови, ми маємо одночасно забезпечити високий рівень температури і достатньо високий надлишок повітря (мал. 1). До того ж потрібно зважати на те, що згадана вимога тривалості 2-х секунд перебування в зоні високих температур гарантує, що реальна концентрація діоксинів і фуранів у відхідних газах повинна стати прийнятною для їх надійного очищення до регламентованих $0,1 \text{ нг/м}^3$.

Однак, такі умови вимагають необхідність брати до уваги таку особливу властивість діоксинів, як схильність їх до повторного синтезу у холодній зоні.

Основною вимогою запобігання повторному утворенню поліхлорованих з'єднань під час всіх видів термодеструкції, вважається наявність якісного та постійно регульованого процесу спалювання, який унеможливить синтез попередників діоксинів і фуранів [14]. Такий процес має включати контроль складу і підготовку відходів не тільки перед спалюванням, а й на етапі збору (встановлення попередніх обмежень з номенклатури і розмірів відходів, візуальний огляд і подальший відбір прибуваючих відходів з місць збирання). Якщо технологія спалювання правильно підібрана та добре контрольована, тоді відбувається ефективна деструкція шкідливих вихідних речовин. Коли ми розглядаємо зону охолодження установки (там, де має відбуватись утилізація енергії), основним завданням в цій зоні буде саме підтримування відповідного температурного режиму (мова йде про максимально швидке охолодження газів у вузькому проміжку між 450°C і 200°C) та рівномірність температурного поля, що забезпечить запобігання від повторного утворення шкідливих сполук.

Технологія спалювання, яка передбачатиме допалювання продуктів згорання відходів в топках енергетичних котлів, зможе забезпечити більш повний та надійний розклад діоксинів і фуранів, що має унеможливити їх повторний синтез. Додатковим позитивним ефектом вищезгаданого

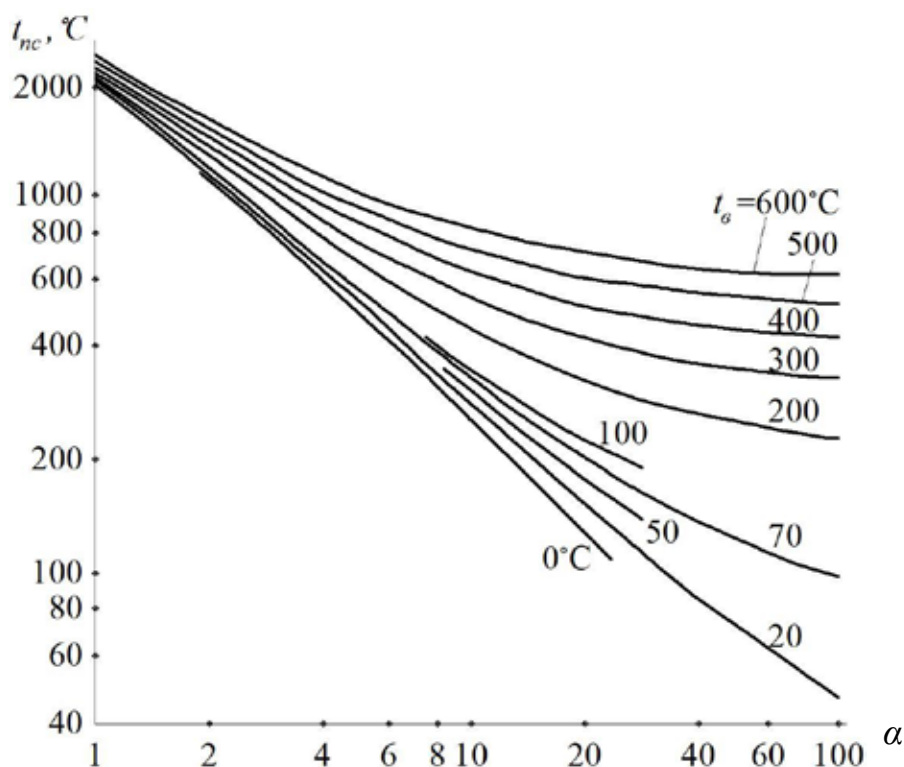


Рис. 1. Графік залежності температури продуктів згоряння від коефіцієнту надлишку повітря

підходу може стати зниження концентрації викидів NO_x у вихідних газах самих енергетичних котлів, внаслідок зниження температури їх факела, що також стає нагальним завданням на даний час.

Розглянувши склад ТПВ з точки зору шкідливих складових та горючої частки, можемо зазначити неможливість постійного виконання межових значень викидів діоксинів ($0,1 \text{ нг/м}^3$) тільки за допомогою перелічених вище способів спалювання. Тому, необхідним стає застосування додаткового спалювання продуктів згоряння, а також вловлювання шкідливих викидів.

Температурний режим на вході у зону видалення пилу (електрофільтри і рукавні фільтри) має бути на рівні якомога нижчому за 200°C , тому що в цьому разі поліхлоровані з'єднання будуть добре зчеплюватись з наявними частинками пилу. Такий ефект досягається не тільки додатковим охолодженням, а ще й зменшенням часу перебування розглядуваних пилових частинок за вищих температур [14]. Крім того, не варто забувати про фізико-хімічні методи: каталітичне окиснення для видалення шкідливих поліхлорованих з'єднань у рукавних фільтрах та відома вугільна адсорбція (інжекція активованого вугілля, або вугільної суспензії). Поєднання механічного пиловидалення з якісною хімічною деструкцією сприяє максимально можливому зменшенню викидів шкід-

ливих поліхлорованих з'єднань у повітря [14]. Але вдування адсорбенту (активованого вугілля) в технологічні гази є небезпечним через можливе загоряння пилу (а саме коксового пилу) у фільтрах при вдуванні вугілля більше 50 мг/м^3 .

Найбільш оптимальною технологією для вище згаданого типу спалювання (допалювання продуктів згоряння в топках енергетичних котлів) та ефективної боротьби з діоксинами і фуранами, може стати Струменеві-Нішева Технологія спалювання (СНТ), розроблена в «КПІ ім. Ігоря Сікорського» [15]. Дані конструкції пальників дають суттєві переваги у порівнянні із традиційними. Серед переваг можна назвати менші гідравлічні втрати тиску по тракту окисника, автомобільність та більшу ефективність технологічного процесу сумішоутворення як палива з окисником так і з баластним повітрям в області введення палива в потік. Все це надійно відбувається у широких діапазонах швидкостей, і, відповідно, високих коефіцієнтах широти регулювання робочого діапазону потужності вогне-технічного обладнання. Пальники СНТ надійно забезпечують стійку роботу при $\alpha=1,01\text{--}1,03$.

Висновки. За результатами даного огляду представлених робіт ми можемо встановити, що для того, щоб не наближатися до ситуації вірогідної екологічної катастрофи, в нашій країні потрібно

реалізувати, для початку, на законодавчому рівні відповідність до діючої Директиви 2008/98/ЄС про відходи. З огляду на відомий досвід Європи, можна сказати, що в порівняльному аналізі ситуації, на фоні найбільш розвинених країн, Україна має наразі доволі серйозні проблеми і застосовує чи не найбільш застарілі методи та технології в галузі присвячених знешкодженню твердих побутових відходів (ТПВ).

Наукова спільнота, керівництво країни та людство загалом мають бути серйозно занепокоєні тим, що шкідливі речовини, зокрема діоксини та фурани, навіть у дуже малих кількостях негативно впливають на здоров'я людей та стан довкілля. Аналіз наявних технологій в енергетиці показав, що синтез діоксинів в основному відбувається за низьких температур саме в процесі спалювання відходів. Сучасні встановлені системи газоочищення не є повністю досконалими, тому вони не можуть дати нам ефективне забезпечення екологічної безпеки довкілля при сміттєспалюванні, оскільки не буде виконана така умова як повне видалення токсикантів.

Складування та захоронення ТПВ – можуть бути простими в реалізації, але є небезпечними протягом тривалого часу способами утилізації,

оскільки вони однозначно дуже негативно впливають на навколишнє середовище. Більш ефективним та надійним способом знешкодження ТПВ необхідно вважати високотемпературне спалювання. Ця технологія відмінно вирішує багато завдань, та має суттєві переваги, так як є практично безвідходною. Вона знешкоджує майже всі матеріали переробки; забезпечує таку високу ступінь очищення газів, яка відповідає найсуворішим вимогам; а також вона дозволяє додатково отримати корисну теплоту.

У даному аспекті, технології спалювання «КПП ім. Ігоря Сікорського» можна вважати найбільш перспективними засобами ефективного використання в допалювальних пристроях. В силу того, що вони широко апробовані та успішно застосовуються на багатьох різноманітних об'єктах нашої країни, не виключаючи такі відповідальні та складні як, наприклад, високотемпературні печі металургії. Технології спалювання «КПП» не тільки постійно удосконалюються, а й проходять експериментальні та налагоджувальні випробування спочатку в лабораторних умовах університету, а потім і на діючому обладнанні. Все це приводить до подальшого надійного та ефективного використання їх в промисловості.

Список літератури:

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf> (дата звернення: 21.11.2023).
2. Директива Європейського парламенту і Ради 2008/98/ЄС від 19 листопада 2008 року про відходи та про скасування деяких директив. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/2008-98-ec.pdf> (дата звернення: 22.11.2023).
3. Ходарев О. В. Переробка твердих побутових відходів як фактор економічного розвитку України. *Ефективна економіка*. 2011. № 11. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1353> (дата звернення: 23.11.2023).
4. Бахарев В. С. Оцінка рівня техногенної небезпеки промислових підприємств в умовах пилового забруднення атмосферного повітря / В. С. Бахарев // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ. – 2005. № 5 (34). С. 121–125.
5. Діоксини // Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Діоксини> (дата звернення: 24.11.2023).
6. Основні напрямки діяльності ДП УкрНТЦ «Енергосталь». URL: <http://energostal.kharkov.ua/> (дата звернення: 25.11.2023).
7. Аналіз потенціалу твердих побутових відходів як сировини для виробництва альтернативних палив в Україні / І. Трофімов та ін. Системні еколого-енергетичні дослідження. 2016. № 2. С. 105–111.
8. Municipal solid waste fueled power generation in China: a case study of Waste-to-Energy in Changchun City / H. Cheng et al. *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41, № 21. P. 7509–7515. DOI: 10.1021/es071416g.
9. Grosso M., Motta A., Rigamonti L. Efficiency of energy recovery from waste incineration in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management*. 2010. Vol. 30, № 7. P. 1238–1243. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.02.036.
10. Єдиний сміттєспалювальний завод в Україні: як він працює // UABIO: Біоенергетична асоціація України. URL: <https://uabio.org/news/184/> (дата звернення: 26.11.2023).

11. Карп І., П'яних К., Нікітін Є. Проблема утилізації та знешкодження мулових осадів міських стічних вод та шляхи її вирішення. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2017. № 2. С. 35–48. DOI: 10.33070/etars.2.2017.05.
12. Mukherjee A., Debnath B., Ghosh S. K. A Review on Technologies of Removal of Dioxins and Furans from Incinerator Flue Gas. *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 35. P. 528–540. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.037.
13. Козій О. І. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід / О. І. Козій, М. П. Петрук, Я. І. Вахула // Зб. “Комунальне господарство міст”. – Харків, 2015. – 120(1). – С. 122–125.
14. Діоксинова проблема сміттєспалювання / О. І. Козій та ін. Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2017. № 868. С. 291–297.
15. Mykhailo Abdulin, Oleksandr Siryi, Tetiana Sheleshei, Energy and ecological assessment of gas burning boiler equipment, 2022 *IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (Kyiv, 12-14 October 2022)*. Kyiv, Ukraine, 2022. P. 102–107. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969254.

Abdulin M.Z., Khmara P.P., Shakhbazov I.O. PURIFICATION OF EMISSION GAS OF INCINERATION FURNISHERS IN THE FIREPLACES OF ENERGY BOILERS

The article presents the literature review on the effectiveness of thermal processing of municipal solid waste with emphasis on the environmental aspect of the designated processing method in the furnaces of energy boilers.

At present, as well as in the past and future, the topic of a careful attitude to the environment has always been relevant. If we take a look at the main economic and social problems of humanity, we can see the ever-present problem of the need to dispose of municipal solid waste (MSW). It is worth noting that program documents, including state development strategies, aim to reduce the formation of pollutants and provide the possibility of using household waste as an alternative source of energy and resources. By the way, having completed this task, we will be able to accelerate the pace of transition to high-tech, maximum waste-free models of economic functioning. Bearing in mind the acuteness of the problem of MSW disposal, we can say that if we do not solve it, we will face the threat of critical environmental pollution. Therefore, we consider it necessary to conduct a broad analysis of the technologies of waste incineration processes and the purification of exhaust gases after combustion. We must start from the position that when operating waste incineration plants, the main requirement for their operation is strict control over the level of environmental pollution. When burning waste, among the combustion products that enter the atmosphere, a significant share is occupied by very dangerous substances, such as dioxins and furans, the concentration of which in emissions depends on the temperature regime, technological regulations and the composition of the incinerated waste. When reviewing currently available incineration technologies, it was found that the formation of dioxins and furans occurs at relatively low temperatures (up to 800°C). Unfortunately, even modern gas purification systems are not able to ensure the environmental safety of incineration. This article uses information from works that describe methods of MSW processing, and also pays attention to the neutralization of dioxin formation sources by thermal methods. This problem cannot be solved without modern effective incineration technologies.

Key words: municipal solid waste, garbage, heat treatment, incineration, disposal, dioxins, gas treatment, renewable resources, environmental safety.

Дата надходження статті: 03.07.2025

Дата прийняття статті: 11.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Алексей Є.С.

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

Ніколаєнко Ю.Є.

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

Кравець В.Ю.

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

Руденко О.І.

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

Мельник Р.С.

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

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ З НАРІЗНИМ ВИПАРНИКОМ ПРИ ЗМІННОМУ КУТІ НАХИЛУ

У статті розглянуто визначення оптимального коефіцієнта заповнення гравітаційної теплової труби з нарізним випарником, призначеної для нової системи охолодження світлодіодного освітлювального пристрою. Сучасні електронні пристрої перетворюють значну частину спожитої електричної енергії у тепло, що підвищує їх температуру та знижує надійність і ефективність роботи. Тому забезпечення оптимальних температурних режимів електронної апаратури є критично важливою проблемою. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є використання в системах охолодження електронної апаратури двофазних термосифонів та гравітаційних теплових труб. Завдяки високій ефективній теплопровідності, що на порядки перевищує теплопровідність металів, їх застосування дозволяє відводити значні теплові потоки при мінімальному термічному опорі. Разом з тим, теплові характеристики двофазних термосифонів та гравітаційних теплових труб залежать від: конструктивних параметрів, теплофізичних властивостей теплоносія, коефіцієнта заповнення, величини теплового потоку в зоні випаровування та орієнтації в просторі. Серед зазначених факторів коефіцієнт заповнення є одним з найважливіших, оскільки безпосередньо визначає загальну продуктивність теплопередачі пристрою. У зв'язку з цим, визначенню оптимального значення коефіцієнта заповнення двофазних термосифонів та гравітаційних теплових труб приділяється особлива увага. В даній роботі проведено експериментальні дослідження з визначення впливу коефіцієнта заповнення на теплові характеристики мідної гравітаційної теплової труби з нарізним випарником, заповненої n-пентаном та призначеної для використання в новій системі охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою в умовах вільної конвекції при кутах нахилу до горизонту 20°, 60° та 90°. Було досліджено середню температуру зони випаровування, термічний опір та максимальний тепловий потік, що передається гравітаційною тепловою трубою з трьома різними коефіцієнтами заповнення: 0,7; 1,0 та 1,2. В результаті досліджень встановлено, що найбільш оптимальним є значення коефіцієнта заповнення 1,0, яке забезпечує найбільш ефективну роботу гравітаційної теплової труби в зазначеному діапазоні кутів нахилу при передачі теплового потоку до 190 Вт з термічним опором 0,15–0,38 К/Вт.

Ключові слова: система охолодження, гравітаційна тепла труба, двофазний термосифон, нарізний випарник, коефіцієнт заповнення, термічний опір, тепловий потік, кут нахилу.

Постановка проблеми. Значна частина електричної енергії, яку споживають сучасні електронні пристрої, перетворюється у теплоту, що підвищує їх температуру та знижує надійність і ефективність роботи [1, 2]. Понад 55 % несправностей електронних пристроїв обумовлено підвищеними робочими температурами [3]. Тому забезпечення оптимальних температурних режимів електронної апаратури є критично важливою проблемою. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є використання в системах охолодження електронної апаратури двофазних термосифонів (ДТС) та гравітаційних теплових труб (ГТТ) [4–6], ефективна теплопровідність яких на порядки перевищує теплопровідність металів, що дозволяє відводити значні теплові потоки при мінімальному термічному опорі. Разом з тим, теплові характеристики ДТС та ГТТ залежать від багатьох факторів, таких як: конструктивні параметри, теплофізичні властивості теплоносія, коефіцієнт заповнення (КЗ), величина теплового потоку в зоні випаровування та орієнтація в просторі [7–9]. Серед зазначених факторів коефіцієнт заповнення є одним з найважливіших, оскільки безпосередньо визначає загальну продуктивність теплопередачі ДТС та ГТТ [10]. У зв'язку з цим, визначенню оптимального значення КЗ при розробці ДТС та ГТТ приділяється особлива увага.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час відома значна кількість робіт, присвячених вивченню впливу КЗ на теплові характеристики ДТС та ГТТ [10–16]. Більшість авторів досліджень визначають КЗ як відношення об'єму теплоносія до об'єму зони випаровування (ЗВ) [10–12, 14–15]. Разом з тим, деякі автори визначають КЗ як відношення об'єму теплоносія до загального внутрішнього об'єму ДТС [13]. Оптимальним зазвичай вважають таке значення КЗ, при якому в даній конструкції ДТС або ГТТ з обраним типом теплоносія та кута нахилу до горизонту забезпечується надійна передача максимального теплового потоку при мінімальному значенні термічного опору.

Автори роботи [10] вивчали вплив КЗ на ДТС довжиною 360 мм (зони випаровування та транспорту по 90 мм, зона конденсації (ЗК) – 180 мм) внутрішнім діаметром 15 мм, заповнений деіонізованою водою з чотирма різними значеннями КЗ: 0,25, 0,4, 0,7 та 0,98, в діапазоні густини теплового потоку 4,7–18,9 Вт/см². Внутрішня поверхня ЗВ була оброблена гідрофільним матеріалом, а ЗК – гідрофобним. В результаті дослідження було з'ясовано, що оптимальний КЗ ста-

новить близько 0,4. В роботі [11] досліджували теплові характеристики мідного ДТС довжиною 500 мм (ЗВ та ЗК по 200 мм, зона транспорту (ЗТ) – 100 мм), зовнішнім діаметром 22 мм і товщиною стінки 0,9 мм, заповненого водою з трьома різними КЗ: 0,3; 0,5; 0,7. ЗК мала зовнішні поздовжні ребра довжиною 200 мм, шириною 5 мм і товщиною 0,7 мм, та охолоджувалася проточною водою. Встановлено, що оптимальне значення КЗ дорівнює 0,7 у досліджуваному діапазоні теплового потоку від 100 Вт до 300 Вт. В роботі [12] досліджено вплив спеченого з мідних частинок мікропористого покриття товщиною 500 мкм на внутрішній поверхні ЗВ на теплові характеристики ДТС довжиною 925 мм (ЗВ – 300 мм), внутрішнім діаметром 25 мм. ДТС було заповнено дистильованою водою з КЗ від 0,25 до 1,0. Дослідження проводилось при кутах нахилу від 5° до 90°. Показано, що загальний термічний опір знижується на 51% при КЗ 0,35 і на 30% – при КЗ 0,75. ДТС з мікропористим покриттям демонструє найкращі теплові характеристики під кутами нахилу між 15° і 30° і КЗ між 0,2 і 0,4. Автори роботи [13] досліджували вплив КЗ мідного гладкостінного ДТС з трьома різними теплоносіями (дистильована вода, ацетон, етанол) на його теплові характеристики. Довжина ДТС – 500 мм (ЗВ – 100 мм, ЗТ – 150 мм, ЗК – 250 мм) внутрішнім діаметром 12,7 мм, товщиною стінки 1 мм з водяним охолодженням. КЗ становив 0,2; 0,3 та 0,4 від загального внутрішнього об'єму ДТС, що еквівалентно діапазону зміни КЗ відносно об'єму ЗВ 1,0; 1,5 та 2,0 відповідно. Тепловий потік змінювався від 25 Вт до 125 Вт. Встановлено, що ацетон у робочих діапазонах $0,34 < KZ < 0,4$ (або КЗ відносно об'єму ЗВ від 1,7 до 2,0) при тепловому потоці від 75 Вт до 125 Вт є найбільш прийнятним теплоносієм для ДТС, призначених для використання в системах кондиціонування повітря. В роботі [14] автори досліджували вплив КЗ на теплові характеристики ДТС з нержавіючої сталі довжиною 3000 мм (всі зони по 1000 мм) з внутрішнім діаметром 35 мм (товщина стінки 1,5 мм), призначеного для пасивного охолодження басейнів відпрацьованого ядерного палива, з КЗ: 0,2, 0,3, 0,4, 0,56, 0,75, 1,0 та деіонізованою водою в якості теплоносія. Максимальний переданий тепловий потік 3,9 кВт було досягнуто при КЗ=0,3. Крім того, спостерігались: часткове осушення ЗВ при КЗ=0,2 і обмеження роботи кризою кипіння, а при КЗ 0,75 і 1,0 в ДТС спостерігався «гейзер-ефект». В роботі [15] автори досліджували покращення характеристик мідного ДТС з водою довжиною

500 мм з внутрішнім діаметром 26,04 мм за допомогою нанесення нарізі з різним кроком (0,2 мм, 0,3 мм, 0,4 мм та 0,5 мм) на внутрішній поверхні ЗВ. Було показано, що термічний опір ДТС з різьбовим випарником був знижений до 66,3% порівняно з гладкостінним ДТС. Це доводить, що ДТС з різьбовим випарником можуть знайти застосування, наприклад, в пасивних системах охолодження потужних світлодіодних освітлювальних пристроїв [5, 6] для покращення їх характеристик. Але в [15] дослідження було проведено лише при КЗ 0,25, що є певним обмеженням для використання його в пасивній системі охолодження при значних теплових потоках та при роботі в умовах експлуатації зі змінними кутами нахилу.

Приведений вище аналіз показує, що попри значну кількість публікацій, присвячених вивченню впливу КЗ на теплопередавальні характеристики ДТС та ГТТ, дані щодо оптимального КЗ навіть для одного і того ж теплоносія значно відрізняються. До того ж відсутні дані щодо оптимального КЗ для перспективних ГТТ з нарізною ЗВ. Тому актуальним завданням є визначення оптимального значення КЗ гравітаційної теплової труби з нарізним випарником та обраним типом теплоносія при кутах нахилу, характерних для експлуатації системи охолодження, для якої вона призначена.

Постановка завдання. Метою статті є визначення експериментальним шляхом оптимального значення КЗ мідної ГТТ з нарізним випарником та теплоносієм н-пентаном, призначеної для використання в новій конструкції пасивної системи охолодження світлодіодного освітлювального пристрою при кутах нахилу від 20° до 90°.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети було виготовлено три експериментальні зразки ГТТ з КЗ: 0,7; 1,0; 1,2. В даному випадку КЗ визначався як відношення об'єму заправленої рідини до об'єму ЗВ. Всі зразки було виготовлено із міді і вони мали однакові геометричні розміри: зовнішній діаметр 12 мм, внутрішній – 10 мм, загальна довжина 495 мм, довжина зони випаровування (ЗВ) 40 мм, довжина зони конденсації (ЗК) 406 мм. Розміри зон теплообміну ГТТ було обрано, виходячи із їх практичного призначення – охолодження світлодіодних (LED) модулів в умовах природньої конвекції.

В кожному зразку на внутрішній поверхні ЗВ на всю її довжину було нарізано метричну нарізь з кроком 0,5 мм. Н-пентан використовувався як теплоносіє. Зовнішній вигляд експериментальних зразків приведено на рис. 1.

Зразки ГТТ досліджувались на експериментальній установці, схему якої приведено на рис. 2. Для підведення теплової енергії до ЗВ експериментального зразка ГТТ (1) використовувався електричний нагрівач (2), виконаний у вигляді алюмінієвого блоку, що складався із двох ідентичних половин. По центру кожної половини було виконано канавку під корпус ГТТ. Половини встановлювались на зовнішню поверхню корпусу ГТТ і стягувались гвинтами. Кожна з половин мала по два отвори, в які встановлювались картриджі-нагрівачі. Така конструкція забезпечувала рівномірний підвід теплової енергії як по периметру, так і по довжині ЗВ. Максимальна загальна потужність нагрівача складала 200 Вт. Живлення та регулювання потужності нагрівача забезпечувалось джерелом постійного струму MASTERAM MR15010E (4), а вимірювання потужності – цифровим ватметром CV-721 (3). Для мінімізації втрат теплової енергії в оточуюче середовище зовнішня поверхня нагрівача та зони транспорту теплової труби вкривались декількома шарами матів з базальтового волокна.

Для забезпечення ефективного відведення теплоти від ЗК до оточуючого повітря в умовах вільної конвекції на зовнішню поверхню корпусу ГТТ встановлювалось три однакових за конструкцією алюмінієвих ребристих радіатора (Р1...Р3). Кожен радіатор складався з двох ідентичних половин, в основі кожної з яких по центру було виконано канавки під корпус ГТТ. При встановленні на теплову трубу половини стягувались гвинтами. Для зменшення контактного термічного опору між зовнішньою поверхнею корпусу ГТТ та контактними поверхнями нагрівача та радіаторів використовувалась теплопровідна паста TS-4 з коефіцієнтом теплопровідності 4,5...4,7 Вт/(м·К).

Контроль розподілу температур вздовж ГТТ відбувався за допомогою 12 мідь-константанових термопар (ТП1...ТП4 та ТП6...ТП13), встановлених на зовнішній поверхні її корпусу. Схема розміщення термопар показана на рис. 3.



Рис. 1. Зовнішній вигляд експериментальних зразків

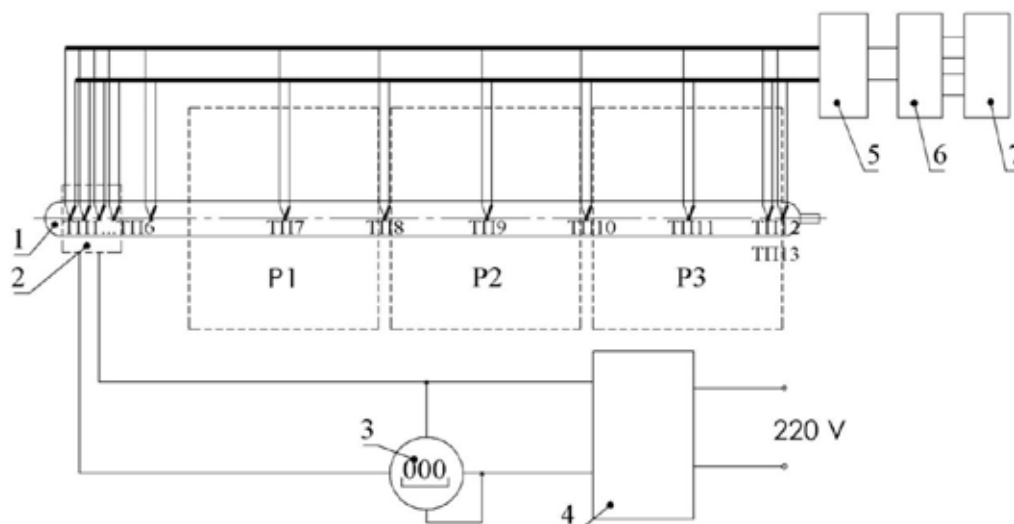


Рис. 2. Схема експериментальної установки

1 – гравітаційна теплова труба; 2 – нагрівач; 3 – цифровий ватметр; 4 – джерело постійного струму; 5 – модуль збору даних; 6 – перетворювач інтерфейсів; 7 – персональний комп'ютер; P1...P3 – радіатори; ТП1...ТП13 – термопари

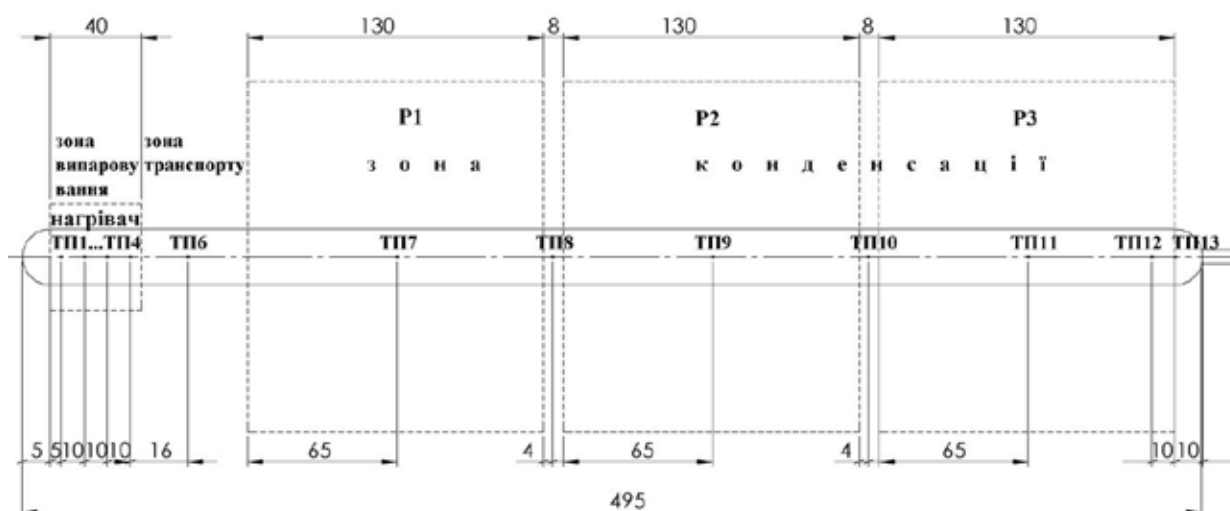


Рис. 3. Схема розміщення термопар на корпусі гравітаційної теплової труби

Окрім показаних на рис. 3 термопар, використовувалась також термопара ТП5, яку було встановлено в гільзі, розміщеній всередині ГТТ, в паровому каналі. Сигнали від всіх термопар надходили на модуль збору даних ICP Con i-7018z (5) (рис. 2), які опитували кожну термопару 1 раз на 1–2 секунди та перетворювали аналогові сигнали термопар на цифрові. Далі сигнали через перетворювач інтерфейсів ICP Con i-7651 (6) подавались на персональний комп'ютер (7), на якому було встановлено програмне забезпечення EZ Data Logger, що дозволяло спостерігати за змінами показів термопар в реальному часі та зберігати їх для подальшої обробки.

При проведенні досліджень ГТТ разом із встановленими на ній термопарами, нагрівачем та радіаторами закріплювалась на штативі, який дозволяв змінювати кут нахилу (рис. 4). В даному дослідженні кутом нахилу вважався кут між віссю ГТТ та горизонталлю. Дослідження проводились при кутах нахилу 20°, 60° та 90°. Величина кута нахилу контролювалась за допомогою цифрового кутоміра. При цьому відведення теплоти від радіаторів ЗК відбувалось до оточуючого повітря в умовах природньої конвекції, температура повітря складала 20±1°C.

При проведенні експериментальних досліджень спочатку виставлявся певний кут нахилу



Рис. 4. Розміщення гравітаційної теплової труби на експериментальній установці

ГТТ, після чого підводилась перша потужність, що дорівнювала 20 Вт. В подальшому підведена потужність збільшувалась з кроком 20 Вт до досягнення величини 60 Вт, а далі – з кроком 40 Вт до досягнення величини 180 Вт. При кожному із значень підведеної потужності фіксувалась її величина, а стаціонарний режим, що визначався за відсутністю зміни температури на всіх термопарах протягом 5 хвилин, витримувався теж не менше 5 хвилин. Дослід припинявся у випадку виникнення кризи теплообміну в ЗВ, про що свідчило різке зростання показів термопар в цій зоні, або при досягненні підведеної потужності 190 Вт. Протягом всього дослідів відбувався неперервний запис показів усіх термопар, а після його завершення – їх збереження для подальшої обробки. Після завершення дослідів підведена потужність зменшувалась до нуля, ГТТ охолоджувалась до температури оточуючого повітря, виставлялось нове значення кута нахилу і процедура повторювалась.

Теплопередавальними характеристиками ГТТ, що вивчались, були: середня температура ЗВ $\overline{t_{3B}}$, термічний опір ГТТ R та максимальний тепловий потік, що передається, $Q_{\max}$. Для їх визначення спочатку осереднювались покази кожної термопари для кожного стаціонарного режиму:

$$\overline{t_n} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}, \quad (1)$$

де n – порядковий номер термопари;

t_i – покази термопари, °C;

m – кількість показів термопари за час стаціонарного режиму.

За осередненими показами термопар знаходились середні температури в усіх зонах ГТТ:

$$\overline{t_{3B}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}; \quad \overline{t_{3T}} = \frac{t_5 + t_6}{2}; \quad (2)$$

$$\overline{t_{3K}} = \frac{t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} + t_{13}}{7}.$$

Термічний опір ГТТ визначався як:

$$R = \frac{\overline{t_{3B}} - \overline{t_{3K}}}{Q_{\text{підв}}}, \quad (3)$$

де $Q_{\text{підв}}$ – підведений до ГТТ тепловий потік, величина якого визначалась за показами ватметра, Вт.

Максимальний тепловий потік, що передається, визначався як значення підведеного теплового потоку, що відповідав мінімальному термічному опору ГТТ.

Проведені попередні налагоджувальні дослідів показали, що втрати теплоти в оточуюче середовище не перевищували 4%, а отже ними можна знехтувати. Тому для визначення термічного опору ГТТ та максимального теплового потоку, що передається, використовувалась величина підведеного теплового потоку.

Відносні похибки визначення досліджуваних величин не перевищували: для середньої температури ЗВ $\overline{t_{3B}}$ – 5,5%, для термічного опору R – 0,3%, для максимального теплового потоку, що передається $Q_{\max}$ – 0,02%.

Середня температура ЗВ $\overline{t_{3B}}$ є важливою характеристикою ГТТ, призначених для використання в системах охолодження LED та інших електронних компонентів, оскільки вона дозволяє оцінити середню температуру об'єкта охолодження, тому необхідно обирати такі параметри ГТТ, при яких вона буде найнижчою. Результати дослідження впливу КЗ на середню температуру ЗВ приведено на рис. 5.

Як видно з рис. 5, при всіх досліджених КЗ та кутах нахилу спостерігається лінійне зростання середньої температури ЗВ із збільшенням теплового потоку. Єдиними виключеннями є точки для ГТТ з КЗ=0,7 при підведеній потужності 180 та 190 Вт та куті нахилу 20° (рис. 5а), де спостерігається більш різке зростання температури у порівнянні з нижчими потужностями, іншими КЗ та кутами нахилу. Це пояснюється наявністю передкризових явищ, пов'язаних із виникненням локальних місць осушення на внутрішній поверхні ЗВ. При всіх досліджених кутах нахилу найнижча середня температура ЗВ спостерігалась у ГТТ з КЗ=1,0. Зокрема при КЗ=0,7 середня температура ЗВ була на 8–30% вище, ніж при КЗ=1,0 (в точках передкризового режиму роботи різниця може сягати 46–49%), а при КЗ=1,2 – на 8–16% вище. Це чітко вказує на те, що в діапазоні КЗ від 0,7 до 1,2 існує оптимальне значення, яке для заданої конфігурації ГТТ в даних умовах

дослідження дорівнює 1,0. Для пояснення такого впливу КЗ на середню температуру ЗВ розглянемо залежність перепаду температур по ЗВ, який визначається як різниця середніх температур ЗВ та ЗТ, від теплового потоку. На рис. 6 як приклад приведено таку залежність для всіх досліджених КЗ при куті нахилу 20°.

При КЗ=1,0 перепад температур є найнижчим в усьому діапазоні підведених теплових потоків (рис. 6). Причому така тенденція зберігається і для інших досліджених кутів нахилу. Вона свідчить про те, що при КЗ=1,0 середня інтенсивність теплообміну в ЗВ найвища. Це пояснюється співвідношенням площ внутрішньої поверхні ЗВ, на яких відбувається кипіння в об'ємі та в плівці рідини. В [15] шляхом експериментального дослідження локального теплообміну в нарізній ЗВ термосифона було показано існування двох ділянок: на одній відбувається кипіння в об'ємі рідини, а на іншій – в плівці, причому на остан-

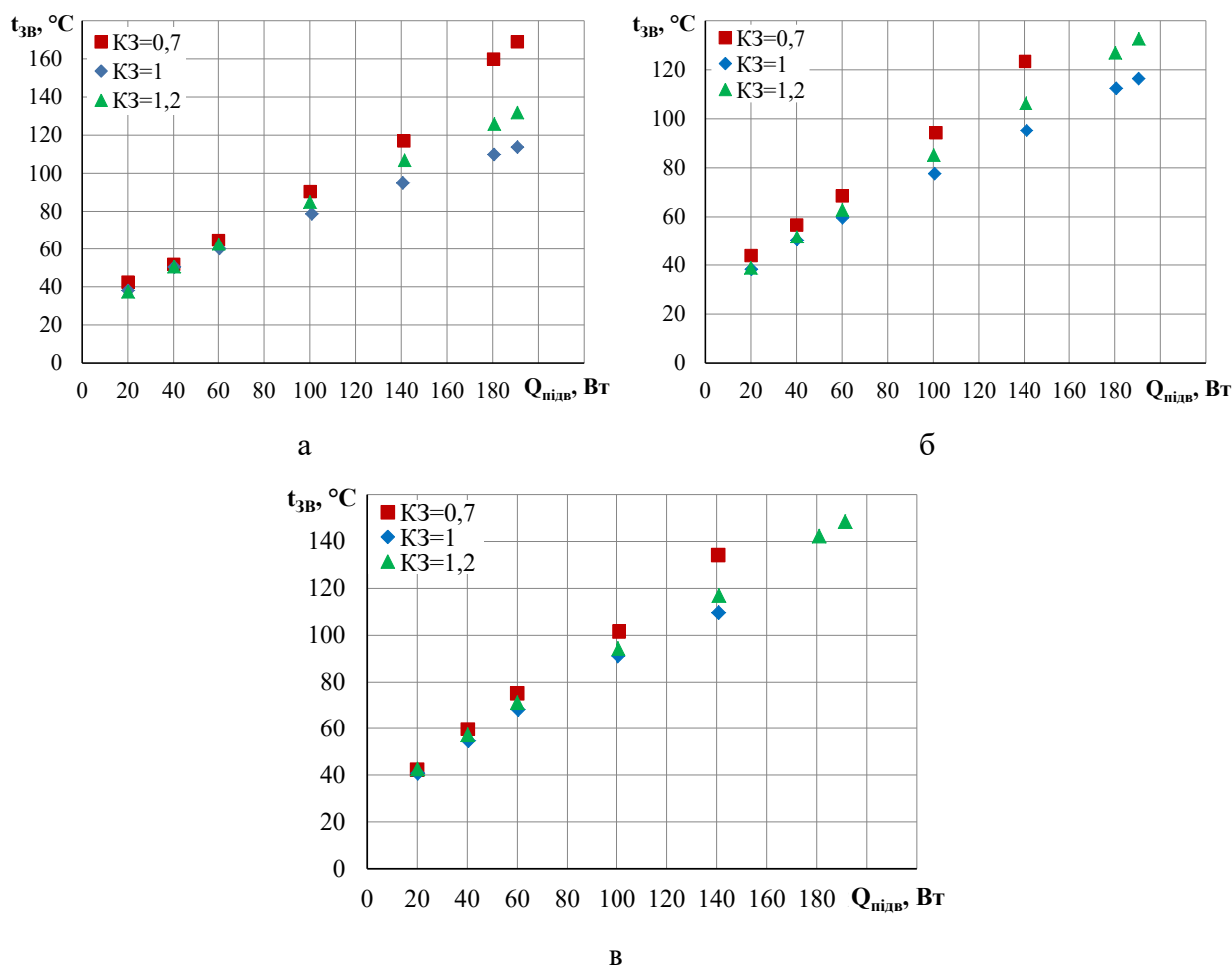


Рис. 5. Вплив коефіцієнта заповнення на середню температуру зони випаровування при кутах нахилу: 20° (а), 60° (б) та 90° (в)

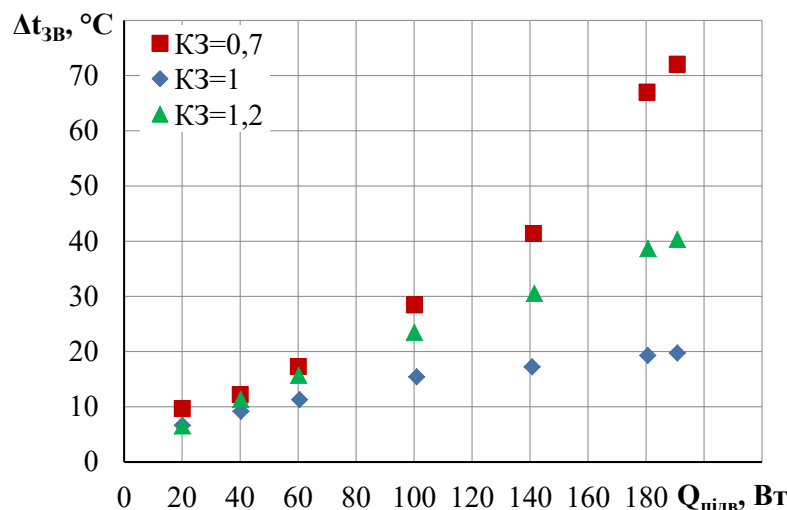


Рис. 6. Перепад температур по зоні випаровування при куті нахилу 20°

ній інтенсивність теплообміну значно вища, ніж на першій. При цьому плівка формується та утримується на поверхні ЗВ значною мірою завдяки наявності нарізі. Таким чином зміна співвідношення площ цих ділянок в бік збільшення ділянки з кипінням в плівці рідини сприяє підвищенню середньої інтенсивності теплообміну в ЗВ і, як наслідок, покращенню теплопередавальних характеристик термосифона, і навпаки. Проте в [15] дослідження було проведено лише при вертикальній орієнтації термосифона (кут нахилу 90°), коли рідка фаза теплоносія в ЗВ має форму вертикального стовпчика. В [16] шляхом проведення візуалізаційних досліджень було показано, що при кутах нахилу менших 90° стовпчик рідини в ЗВ деформується, і рідина «розтягується» вздовж нижньої твірної корпусу ГТТ. При цьому стікання плівки конденсату з ЗК також відбувається вздовж нижньої твірної. Таким чином в гладкостінному термосифоні частина площі внутрішньої поверхні ЗВ вздовж верхньої твірної виявляється не змоченою рідким теплоносієм, через що не приймає участі в двофазному теплообміні. Це призводить до підвищення середньої температури ЗВ і погіршення теплопередавальних характеристик термосифона в цілому. В ГТТ з нарізною ЗВ такого не відбувається, оскільки під дією капілярних сил рідина надходить до верхньої твірної, формує там плівку рідини, в якій відбувається кипіння. Але це показує, що для ГТТ, які працюють при кутах нахилу менше 90°, вплив співвідношення площ, на яких відбувається кипіння в об'ємі та в плівці рідини, на теплопередавальні характеристики є навіть вагомим, ніж при вертикальній орієнтації. Таким

чином в даному дослідженні при $K3=1,0$ забезпечувалось найбільш оптимальне співвідношення цих площ, що сприяло підвищенню середньої інтенсивності теплообміну в ЗВ і, як наслідок, зниженню її середньої температури. При $K3=0,7$ рідини могло не вистачати для повного змочування верхньої твірної ЗВ, через що на ній могли виникати локальні сухі плями, що призводило до підвищення середньої температури ЗВ. При $K3=1,2$, навпаки, збільшувалась площа, на якій відбувалось кипіння в об'ємі рідини. Оскільки при такому кипінні інтенсивність тепловіддачі нижча, ніж при кипінні в плівці рідини, то це призводило до зниження середньої інтенсивності тепловіддачі в ЗВ та до підвищення її середньої температури.

Результати дослідження термічного опору ГТТ приведено на рис. 7.

Можна помітити, що для термічного опору спостерігається та ж тенденція, що і для середньої температури ЗВ, а саме: якісно зміна термічного опору зі зміною підведеного теплового потоку однакова для всіх досліджених $K3$ та кутів нахилу, але кількісно найменший термічний опір має ГТТ з $K3=1,0$ (рис. 7). Зокрема, при $K3=0,7$ термічний опір на 24–129% вище, ніж при $K3=1,0$, а при $K3=1,2$ – на 11–69% вище. Таким чином, для термічного опору також спостерігається оптимум при $K3=1,0$.

Слід відмітити, що при $K3=0,7$ та кутах нахилу 20° та 90° в області високих теплових потоків (180–190 Вт та 140 Вт, відповідно) в зоні випаровування ГТТ спостерігаються передкризові явища, чим і пояснюється різке підвищення термічного опору в цих точках (рис. 7а, в).

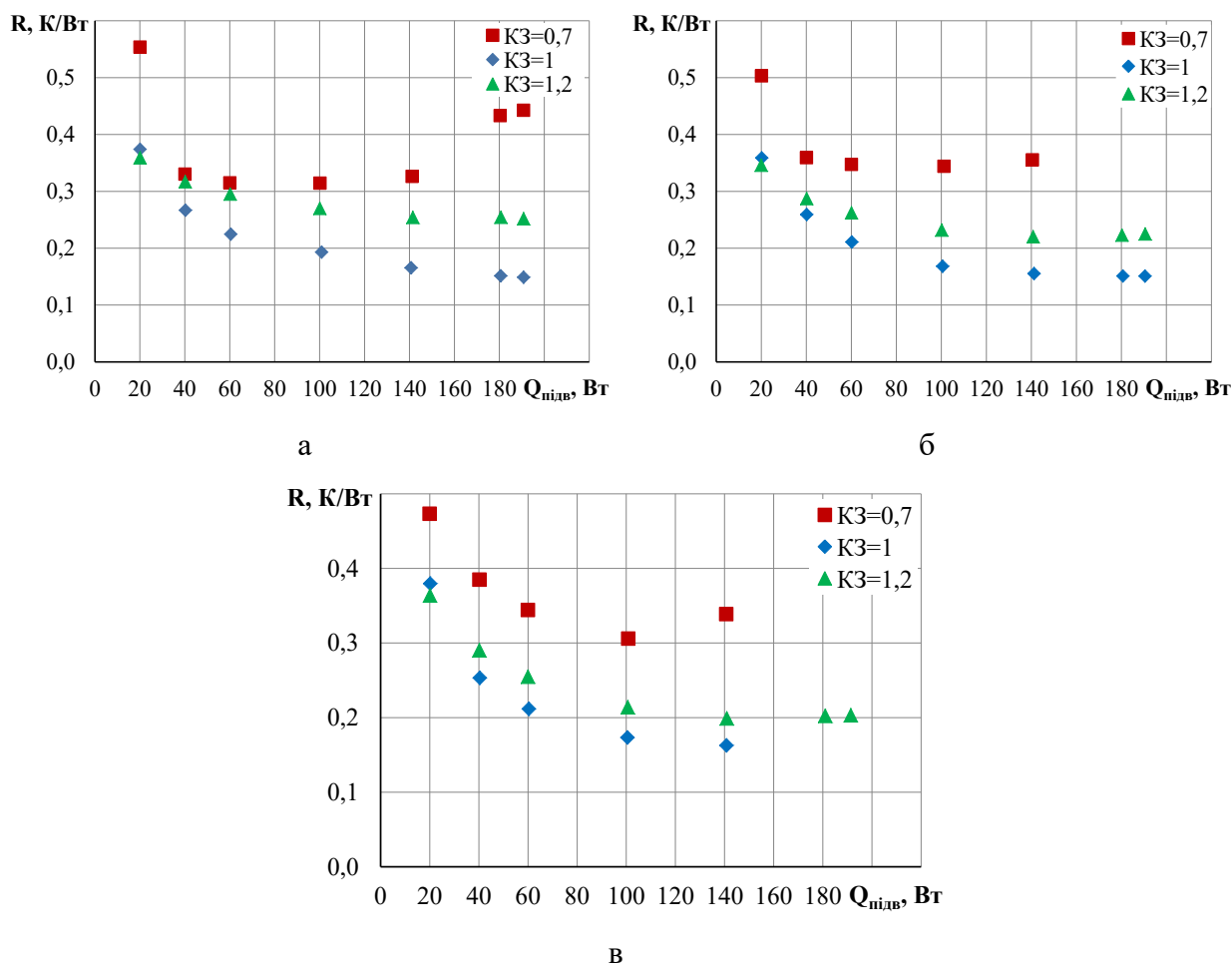


Рис. 7. Вплив коефіцієнта заповнення на термічний опір гравітаційної теплової труби при кутах нахилу: 20° (а), 60° (б) та 90° (в)

В цілому, пояснити отриманий вплив $K3$ на термічний опір можна, якщо розглянути загальний термічний опір ГТТ як суму термічних опорів:

$$R = R_{3B}^{cm} + R_{3B} + R_{пк} + R_{3K} + R_{3K}^{cm}, \quad (4)$$

де R_{3B}^{cm} , R_{3K}^{cm} – термічний опір стінки корпусу ГТТ в зонах випаровування та конденсації, відповідно, К/Вт;

R_{3B} , R_{3K} – термічний опір теплообміну в зонах випаровування та конденсації, відповідно, К/Вт;

$R_{пк}$ – термічний опір в паровому каналі (зона транспорту), К/Вт.

Оскільки корпуси досліджуваних ГТТ виготовлено з міді, яка має високу теплопровідність ($\approx 385\text{--}400$ Вт/(м·К)), а товщина стінки корпусів відносно невелика, то термічними опорами стінки в 3В та 3К у виразі (4) можна знехтувати. Згідно [4] термічний опір парового каналу можна не враховувати, якщо швидкість пари не перевищує 0,2М (М – число Маха). В даному дослідженні швидкість пари в паровому каналі не перевищувала

0,4 м/с, що відповідає приблизно 0,002М, а отже термічним опором парового каналу можна знехтувати. Таким чином, загальний термічний опір ГТТ визначається термічними опорами теплообміну в 3В та 3К, які є обернено пропорційними до середніх коефіцієнтів тепловіддачі та площ поверхонь теплообміну в цих зонах. Середні коефіцієнти тепловіддачі в 3В та 3К є величинами одного порядку, а площа поверхні теплообміну 3К досліджуваних ГТТ в 10 разів більша від площі поверхні теплообміну 3В. Це означає, що термічний опір теплообміну в 3К буде приблизно на порядок менше від термічного опору теплообміну в 3В. Отже, основний внесок в загальний термічний опір ГТТ робить саме термічний опір теплообміну в 3В. Середній коефіцієнт тепловіддачі в цій зоні є мірою середньої інтенсивності теплообміну. Як було показано вище, саме при $K3=1,0$ ця інтенсивність буде найвищою, а отже термічний опір теплообміну в 3В буде найнижчим, і, як наслідок, найнижчим буде і загальний термічний опір ГТТ.

Значення максимального теплового потоку, що передається, при всіх досліджених КЗ та кутах нахилу приведено в табл. 1.

Таблиця 1
Максимальні теплові потоки, що передаються, в залежності від коефіцієнта заповнення та кута нахилу, Вт

Кут нахилу	Коефіцієнт заповнення		
	0,7	1,0	1,2
20°	100	>190	>190
60°	100	>190	>190
90°	100	160	>190

Приведені в табл. 1 дані показують, що при всіх досліджених кутах нахилу найменше значення максимального теплового потоку, що передається, відповідає $KZ=0,7$. При цьому для ГТТ з коефіцієнтом заповнення 1,0 та 1,2 ця величина в більшості випадків перевищує 190 Вт (позначка «>190» в табл. 1). Це пояснюється тим, що в термосифонах та ГТТ збільшення кількості заправленої рідини, тобто збільшення КЗ, як правило, приводить до збільшення максимального теплового потоку, що передається. Деяке зниження величини Q_{max} при $KZ=1,0$ та куті нахилу 90° можна пояснити погіршенням умов відведення теплоти від ЗК. Це пов'язано з тим, що при даному куті нахилу ребра радіаторів, встановлених на ЗК, займають майже горизонтальне положення, а горизонтальне оребрення в умовах вільної конвекції є найменш ефективним.

Однак, при виборі оптимального КЗ не можна керуватись лише величиною максимального

теплового потоку, що передається, необхідно розглядати теплопередавальні характеристики ГТТ в комплексі. Тому, підсумовуючи наведені вище дані, щодо основних теплопередавальних характеристик ГТТ, можна стверджувати що оптимальне значення КЗ для досліджених ГТТ дорівнює 1,0.

Висновки. 1. В результаті проведення експериментального дослідження було з'ясовано, що для досліджених ГТТ з нарізною ЗВ та теплоносієм н-пентаном при зміні кута нахилу від 20° до 90° та повітряному охолодженні в умовах вільної конвекції оптимальним значенням КЗ є 1,0.

2. При $KZ=1,0$ досліджені ГТТ мали на 8–30% нижчу середню температуру ЗВ, на 24–129% нижчий термічний опір ніж при значеннях КЗ 0,7 та 1,2. А при кутах нахилу 20° та 60° максимальний переданий тепловий потік ГТТ з $KZ=1,0$ був більш ніж в 1,9 разів вищий ніж у ГТТ з $KZ=0,7$.

3. Отримані результати можуть бути корисними при створенні на основі ГТТ з нарізною ЗВ систем охолодження LED або інших електронних компонентів, що працюють в умовах вільної конвекції.

4. Подальші дослідження в даній області можуть бути направлені на вивчення оптимального КЗ для ГТТ з іншими геометричними параметрами корпусу, параметрами нарізі та теплоносіями.

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2023.04/0055).

Список літератури:

1. Ren Y., Luo W., He Z., Qin N. et al. Development and performance study of a radiation-enhanced heat pipe radiator for cooling high-power IGBT modules. *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 262. Art. no. 125307. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125307.
2. Yurtseven M., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Research & Technology*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 943–965. DOI: 10.1177/1477153515576785.
3. Li Z., Luo H., Jiang Y., Liu H. et al. Comprehensive review and future prospects on chip-scale thermal management: Core of data center's thermal management. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 251. Art. no. 123612. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123612.
4. Кравець В.Ю. Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження: монографія. Харків, 2018. 288 с.
5. Nikolaenko Yu.E., Alekseik Ye.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 8. P. 418–425. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.09.012.
6. Потужний світлодіодний освітлювальний пристрій : пат. 15943 Україна: МПК F21V29/00, F21V29/71. № u202404707; заявл. 01.10.2024; опубл. 28.05.2025, Бюл. № 25. 6 с.
7. Mathry A. H., Al-Mousawi F.N., Dhaidan N.S., Al-Shohani W.A.M. et al. Impact of design and operating parameters on the thermal performance of heat pipes: A review. *Journal of Engineering Research*. 2025. Vol. 13. Iss. 2. P. 985–1000. DOI: 10.1016/j.jer.2024.02.004.

8. Jouhara H., Robinson A.J. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283. *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30, no. 2-3. P. 201–211. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.08.007.
9. Jiao B., Qiu L.M., Zhang X.B., Zhang Y. Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28, no. 11-12. P. 1417–1426. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.09.009.
10. Lv F.Y., Zhang P., Orejon D., Askounis A. et al. Heat transfer performance of a lubricant-infused thermosyphon at various filling ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 115. P. 725–736. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.062.
11. Alizadeh M., Ganji D.D. Heat transfer characteristics and optimization of the efficiency and thermal resistance of a finned thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 183. Art. no. 116136. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116136.
12. Kim Y., Shin D.H., Kim J.S., You S.M. et al. Effect of sintered microporous coating at the evaporator on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 131. P. 1064–1074. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.134.
13. Carvajal-Mariscal I., De Leon-Ruiz J.E., Vazquez-Arenas J., Venegas M. Effect of Working Fluid-Filling Ratio Combination on Thermosyphon Performance as Add-In Enhancer for Indoor Air Conditioning Devices. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 16. Art. no. 5939. DOI: 10.3390/en15165939.
14. Castro S.I.C., Kirsch M., Kulenovic R., Starflinger J. Experimental investigation of the heat transfer characteristics, operating limits, and temperature distribution of a prototypically 3 m long two-phase closed thermosyphon for spent fuel pool passive cooling. *Experimental and Computational Multiphase Flow*. 2024. Vol. 6. P. 229–241. DOI: 10.1007/s42757-024-0193-2.
15. Kang S., Lee S., Lee J. Performance enhancement of two-phase closed thermosyphon with threaded evaporator surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. Vol. 164. Art. no. 108939. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108939.
16. Мельник Р.С., Ліпницький Л.В., Ніколаєнко Ю.Є., Кравець В.Ю. та ін. Візуалізація процесів пароутворення у двофазному термосифоні за різної його орієнтації в просторі. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2021. № 5-6. С. 46–52. DOI: 10.15222/TKEA2021.5-6.46

Alekseik Ye.S., Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Rudenko O.I., Melnyk R.S. DETERMINATION OF THE FILLING RATIO OPTIMAL VALUE OF A GRAVITY HEAT PIPE WITH A THREADED EVAPORATOR AT VARIABLE INCLINATION ANGLE

The article deals with determination of the optimal filling ratio of a gravity heat pipe with a threaded evaporator designed for a new cooling system of an LED lighting device. Modern electronic devices convert a significant portion of the electrical energy they consume into heat, which increases their temperature and reduces their reliability and efficiency. Therefore, ensuring optimal temperature conditions for electronic equipment is a critical issue. One of the ways to solve this problem is to use two-phase thermosyphons and gravity heat pipes in electronic equipment cooling systems. Due to their high effective thermal conductivity, which is orders of magnitude higher than that of metals, their use allows to remove significant heat fluxes with minimal thermal resistance. At the same time, the thermal characteristics of two-phase thermosyphons and gravity heat pipes depend on: design parameters, thermophysical properties of the heat carrier, filling ratio, heat flux in the evaporator and orientation in space. Among these factors, the filling ratio is one of the most important, as it directly determines the overall heat transfer performance of the device. In this regard, special attention is paid to determining the optimal value of the filling ratio for two-phase thermosyphons and gravity heat pipes. In this work, experimental studies were conducted to determine the effect of the filling ratio on the thermal characteristics of a copper gravity heat pipe with a threaded evaporator filled with n-pentane and intended for use in a new cooling system for a powerful LED lighting device at an air temperature of +20°C under free convection conditions at angles of inclination to the horizon of 20°, 60°, and 90°. The average evaporator temperature, thermal resistance, and maximum heat flux transferred by the gravity heat pipe with three different filling ratios of 0.7, 1.0 and 1.2 were investigated: As a result of the research, it was found that the most optimal value is the filling ratio of 1.0, which ensures the most efficient operation of the gravity heat pipe in the specified range of inclination angles when transmitting a heat flux of up to 190 W with a thermal resistance of 0.15–0.38 K/W.

Key words: cooling system, gravity heat pipe, two-phase thermosyphon, threaded evaporator, filling ratio, thermal resistance, heat flux, inclination angle.

Дата надходження статті: 25.06.2025

Дата прийняття статті: 03.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Баранюк О.В.

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

Черноусенко О.Ю.

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

Рачинський А.Ю.

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

Пікенін О.О.

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

МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРУ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ В КОТЛІ ТИПУ ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)

Стаття присвячена CFD-моделюванню процесів, що мають місце при генерації пари в контурі природної циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Процеси генерації пари в паливні котельного агрегату впливають на стабільну та ефективну роботу котлоагрегату в цілому, а моделювання їх з метою мінімізації витрат на дослідження є актуальним і мають велику практичну значущість. Метою роботи є визначення об'ємного паровмісту і швидкості пароводяної суміші на виході з труб, що екранують паливню котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Для досягнення поставленої мети розраховано теплове навантаження на бічні стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) при спалюванні природного газу в чотирьох штатних пальниках ГМГ-5 методами CFD-моделювання в безкоштовній студентській версії ANSYS Student і аналітично, за допомогою Нормативного методу. Визначена дійсна витрата робочого тіла в екранних трубах і швидкість, що в якості граничних умов на вході потоку в нижній роздатковий колектор задавалась у CFD-моделі. За допомогою того ж аналітичного методу визначено середній об'ємний паровміст на окремих ділянках труб контуру природної циркуляції. Ці дані використані з метою верифікації результатів числового експерименту. Оскільки надійних експериментальних даних в доступній літературі немає, а CFD-моделювання після верифікації дозволить отримати локальні дані по всім необхідним термодинамічним параметрам пароводяної суміші.

Результати верифікації свідчить, що значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений за аналітичною методикою знаходяться в межах від 9 до 18%. Такий результат викликаний як припущеннями аналітичної методики так і обмеженнями студентської версії ANSYS. Моделювання дозволило проаналізувати динаміки генерації пари кип'ятильних трубах контуру природної циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) в умовах нерівномірності поля температур на бічних стінках котла і визначити параметри пароводяної суміші на виході з кип'ятильних труб. Ці дані будуть використані в наступних роботах по моделюванню процесів сепарації пари в барабан-сепараторі котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) та при моделюванні його термонапруженого стану.

Ключові слова: випаровування, природна циркуляція, конвективне кипіння, паливня, котел.

Постановка проблеми. Представлена робота присвячена моделюванню параметрів пароводяної суміші, що рухається в екранних трубах котельного агрегату ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз робіт [1] свідчить, що висловив припущення, що електростанції, які працюють на вихопному паливі, з потужними котлоагрегатами

можуть замінити в майбутньому атомні електростанції. Сильна тенденція до цього переходу спостерігається в промислово розвинених країнах, особливо після нещодавньої ядерної кризи на Фукусімі.

Барабанні котли використовують принцип природної циркуляції води, де різниця в густині викликає циркуляцію води, що екранують стінки паливні котла і з'єднують його барабан з нижніми роздатковими колекторами. Радіаційний теплообмін між факелом розжарених газів в паливні котла і водою в трубах, що екранують стінки паливні призводить до утворення бульбашок пари в заповнених водою екранних трубах, які природним чином відокремлюються від води в стані насичення в барабані. Фізичні явища під час випаровування досить складні. Як динаміка, так і зв'язки між властивостями рідини є дуже нелінійними, а ключові величини, такі як точка висихання або величина перегріву, важко виміряти. Багато факторів сприяють тому, що ці процеси важко контролювати. Наприклад, було помічено, що можуть виникати різні типи нестабільностей/коливань потоку [2].

Важливо розуміти, що барабанний котел є дуже нелінійною складною системою, тому глибоке розуміння цього процесу є важливим для проектування системи керування котлом. Моделювання динаміки барабанного котла розглядалося багатьма дослідниками протягом багатьох років. Багато досліджень було присвячено управлінню на основі моделей. Розробка математичної моделі для котлів барабанного типу вимагає комбінації нелінійних рівнянь для опису випаровування у вертикальних трубах та розділення фаз у паровому барабані, як показано в [3]. Ці автори досліджували двофазний потік в середині вертикальних труб, тоді як автори [4] представили модель для прогнозування температури вертикальних труб.

Теплові процеси, що пов'язані з підведенням до парогенератора сучасних енергоблоків атомних електричних станцій живильної води від системи водної підготовки та теплоносія від ядерного реактора, а також з відведенням пари з парогенератора до головного парового колектору є ключовими в системі безпечної експлуатації парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку з ядерним реактором ВВЕР-1000. Автори [5] побудували математичну модель парогенератора як об'єкта управління у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь десятого порядку у відносних змінних і розробили формули для обчислення значень

постійних параметрів. Розроблена програма для моделі парогенератора ПГВ-1000, включена до інформаційної технології оптимізації управління.

В рамках європейської співпраці була розроблена нова мова моделювання під назвою Modelica [6]. Modelica базується на досвіді членів дизайнерської групи Modelica та прагне стати стандартом для моделювання в неперервному часі та гібридного моделювання на основі рівнянь. В рамках цих зусиль було розроблено кілька базових бібліотек Modelica для застосувань у різних областях, серед яких термогідравлічна базова бібліотека [7]. Ця бібліотека використовується тут для побудови дискретизованої моделі киплячої трубки.

Спочатку на основі перших принципів виводиться проста аналітична модель низького порядку. Проста модель здатна фіксувати коливання, які спостерігалися експериментально. Вона також може дати уявлення про механізми, що генерують коливання. Потім за допомогою термогідравлічної базової бібліотеки Modelica будується більш складна модель. Моделювання складної моделі показує, що вона дає результати, порівнянні зі спрощеною моделлю, а також близькі до експериментальних даних.

Авторами [6] отримано спрощену модель котлової труби, яка дає уявлення про те, як виникає відоме явище нестабільності, коливання перепаду тиску. Спрощена модель також дає результати, близькі до вимірювань у [8]. Спрощену модель також порівнювали з двома різними дискретизованими моделями, розробленими в Modelica. Однопотокова модель зі зосередженим балансом маси та дискретизованим балансом енергії, а також повністю дискретизована модель. Показано, що однопотокова модель дає більш реалістичні коливання, ніж спрощена модель. Однак повністю дискретизована модель дає високочастотні коливання через ефекти дискретизації та не є надійною для дослідження коливань перепаду тиску.

Проте, моделювання з використанням термогідравлічної базової бібліотеки в Modelica, не є достатньо поширеним явищем серед інженерів на теренах України. Найбільш реальним варіантом вирішення подібних задач є використання CFD-коду з високою дискретизацією.

Найближчою до тематики статті є робота [9] автори якої розробили спрощену числову модель процесів випаровування всередині вертикальних труб, враховані такі двофазні режими потоку (рис. 1) як однофазна рідина, бульбашковий потік, снарядний потік, кільцевий потік, кільцевий потік

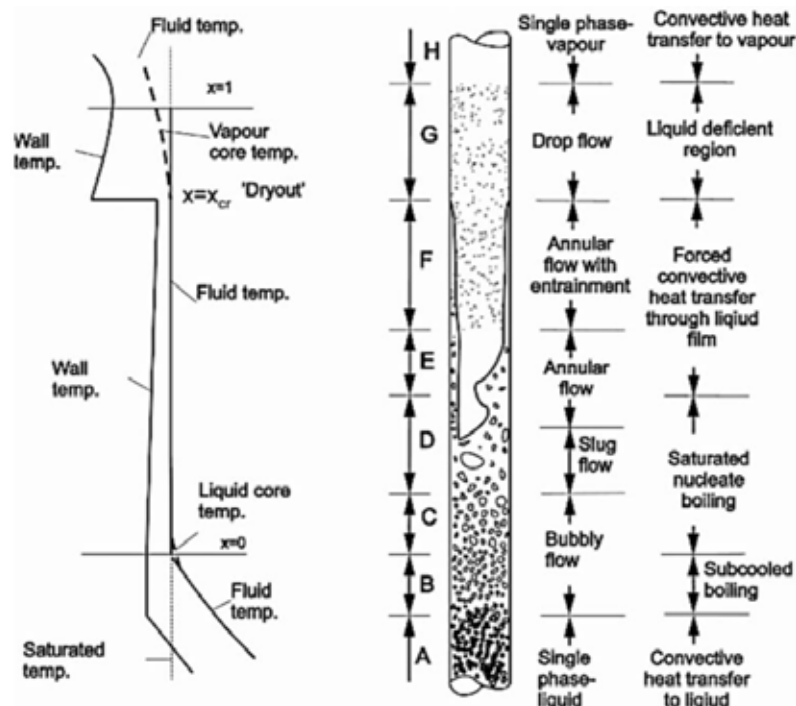


Рис. 1. Області теплопередачі та схеми потоків під час конвективного кипіння [9]

із захопленням, крапельний потік та однофазний потік пари.

Проте, в моделі [9] визначаються лише температурні поля в рідинній області (рідина або двофазна суміш) та твердій області (стінка труби). У цій моделі використовуються аналітичні формули, які дозволяють розрахувати перепад тиску та розподіл коефіцієнта теплопередачі уздовж довжини труби. Енергетичне рівняння для рідинної області розв'язується методом контрольованого об'єму, а для твердої області – методом скінченних елементів, щоб визначити температурне поле для рідинної та твердої областей.

Аналіз літературних джерел [1–17] свідчить, що в умовах вільної конвекції, теплообмін у рідині, яка випаровується, відбувається завдяки природним конвективним потокам, які виникають внаслідок різниці густини рідини. При цьому в зоні випаровування утворюється тонкий граничний шар, де відбувається найбільш інтенсивний теплообмін. Ключовим фактором є температура поверхні випаровування: вона визначає тепловий потік, спрямований від рідини до парової фази. Під дією сили Архімеда легша гаряча рідина або пара піднімається вгору, а більш холодна рідина заповнює простір біля поверхні нагріву. У результаті формується стійкий вільно-конвективний потік, який забезпечує відведення тепла і підтримання процесу випаровування. Цей механізм особливо важливий для систем з природною циркуляцією

теплоносія, а саме котельних агрегатах з барабан-сепаратором. На основі робіт [1–17] можна вибрати рекомендації щодо моделювання процесу випаровування рідини при її вільно-конвективному русі. На основі цих рекомендацій можна вирішити складну інженерну задачу моделювання контуру природної циркуляції в котлі типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) за допомогою студентської версії ANSYS-Fluent. В доступній літературі рішення такого роду задач не спостерігається.

Постановка завдання. Метою статті є визначення параметрів пароводяної суміші яка з труб, що екранують стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ), потрапляє в його барабан.

Метод дослідження – комп'ютерне моделювання теплових потоків спрямованих від факелу розжарених газів в паливні котельного агрегату котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) до рідини, що рухається і поступово випаровується в екранних трубах згаданого котельного агрегату. Комп'ютерне моделювання виконувалось в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єкт дослідження – це процеси теплообміну і гідродинаміки, що мають місце при вільно – конвективному русі рідини в трубах, що екранують стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) під час її випаровування.

Предмет дослідження – є термодинамічні параметри пароводяної суміші на виході з труб, що екранують стінки паливни котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Виклад основного матеріалу. При моделюванні течії в контурі природної циркуляції автори спирались на відоме твердження, що при течії рідини через нагріту трубку, вона спочатку нагрівається до температури кипіння, коли відбувається кипіння, утворюється суміш рідини та газу, і, нарешті, нагрівається лише газ. Це схематично показано на рис. 2. Зона нагрівання знаходиться від 0 до Q_1 , зона кипіння – від Q_1 до $Q_1 + Q_2$, і після цієї точки в трубці рідини не залишається. Якщо потік достатньо швидкий, рідина не проводить достатньо часу в трубці, щоб вся рідина випарувалася, і тоді залишається лише дві зони. Якщо швидкість потоку ще вища, кипіння може навіть не розпочатися.

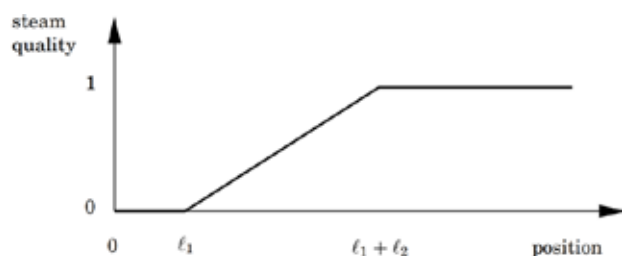


Рис. 2. Розподіл пари вздовж нагрітої трубки [6]

Як свідчить робота [10] температурне поле стінки паливни котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) залежить від теплообміну в її об'ємі. Теплообмін паливни залежить від кількох ключових факторів таких як температурний градієнт (чим більша різниця температур між розжареними газами

(факелами полум'я) і поверхнею нагріву (екранні труби, стінки топки), тим інтенсивніше передається теплота) і гідродинамічна взаємодія факелів розжарених газів від пальників (розташування та інтенсивність факелів, а також рух газоподібного середовища (турбулентність, напрямок і швидкість потоків) суттєво впливають на конвективний теплообмін). А також оптичні властивості факела і поверхонь (ступінь чорності, відображення) також мають велике значення.

Надійшли експериментальних даних по паровмісту, швидкості і температурі пароводяної суміші на виході з труб, що екранують паливню в доступній літературі немає. Тому для верифікації моделі використаний аналітичний метод на основі Норм теплового розрахунку [11]. Невідомі значення розподілу температур на ділянках труб вибирались з попередньої роботи авторів [10].

В якості розрахункової області вибрано три поряд розташовані труби, що екранують паливню котла ГМ-50 (рис. 3). Для розрахунків у середовищі ANSYS-CFX розрахункова область апроксимована за допомогою гібридної сітки, що поєднує структуровану і неструктуровану сітки для точного моделювання приміжових шарів та зручності опису складної геометрії області.

При чому, структурована сітка використовується для моделювання приміжового шару, який розвивається на межі «тверда поверхня – рідина». Для створення такої сітки застосовано не менше 20 шарів елементів. Кожен наступний шар має товщину, що на 10% більша за попередній, що забезпечує плавне збільшення розміру елементів у напрямку від стінки. Така сітка дозволяє адекватно врахувати градієнти швидко-

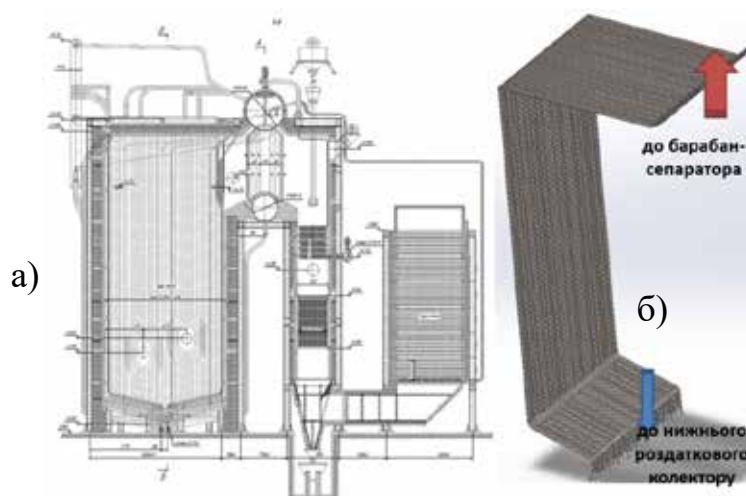


Рис. 3. Поздовжній переріз котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) (а) та труби бічного екрану (б)

стей та температури, характерні для примежової області. Простір між структурованими шарами заповнений неструктурованою тетраедричною сіткою. Розмір елементів у цій області становить 1×10^{-3} м, а їх густина контролюється параметром Relevance Fine. Це дозволяє забезпечити достатню точність розрахунків у центральних зонах потоку.

Для поєднання структурованої та неструктурованої частин сітки застосовується метод MultiZone. Він гарантує якісне узгодження елементів у зоні переходу та підвищує загальну стійкість розрахункової моделі.

Краплі вологи (у вигляді сферичних частинок) моделюються як дискретна фаза за допомогою DPM (Discrete Phase Model). Це дозволяє ANSYS-CFX обчислити траєкторії руху частинок та їхній тепломасообмін з газовою фазою.

Зовнішній вигляд скінченно-елементної сітки показаний на рис. 4. Моделі труб досліджувались послідовно, по одній, оскільки безкоштовна версія ANSYS Student для апроксимації розрахункової області дозволяє використовувати тільки 5000 чарунок. Але для повноти інформації, засобами ANSYS-CFX результати розрахунку по окремим моделям труб зображені на одному листі.

В якості керуючих рівнянь використовується система рівнянь Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями [12]:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + S_m. \quad (1)$$

S_m – рівнодіюча масових сил; μ_{eff} – ефективна в'язкість, що представляє собою суму молекулярної і турбулентної в'язкості; p' – модифікований тиск, як визначено наступним чином:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_i}. \quad (2)$$

Доданки лівої частини системи рівнянь визначають зміну властивостей потоку рідини (пари) у часі та кількості руху молекул рідини. Доданки правої частини рівнянь визначають дію масових сил, сил тиску та сил в'язкості. Таким чином, рівняння розглядаються як баланс сил інерції (ліва частина), масових сил, сил тиску та в'язкості (права частина), що діють на частинку рідини.

Осереднені по Рейнольдсу рівняння енергії:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot} u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h_{tot}}{\partial x_j} \right] + \partial x_i \left[u_i (\tau_{ij} - \rho u_i u_j) \right]. \quad (3)$$

Можливо, перетворення молекулярного дифузійного члена може бути неточним, якщо ентальпія h_{tot} залежить від інших параметрів, не тільки від температури, останнє рівняння записане через турбулентну дифузію є правильним, за умови дотримання гіпотези про вихородифузійність. Більше того, оскільки турбулентна дифузія зазвичай набагато більша, ніж молекулярна, тому невеликі похибки в останній можна ігнорувати.

Разом з рівнянням нерозривності рівняння Нав'є-Стокса і енергії утворюють замкнуту систему:

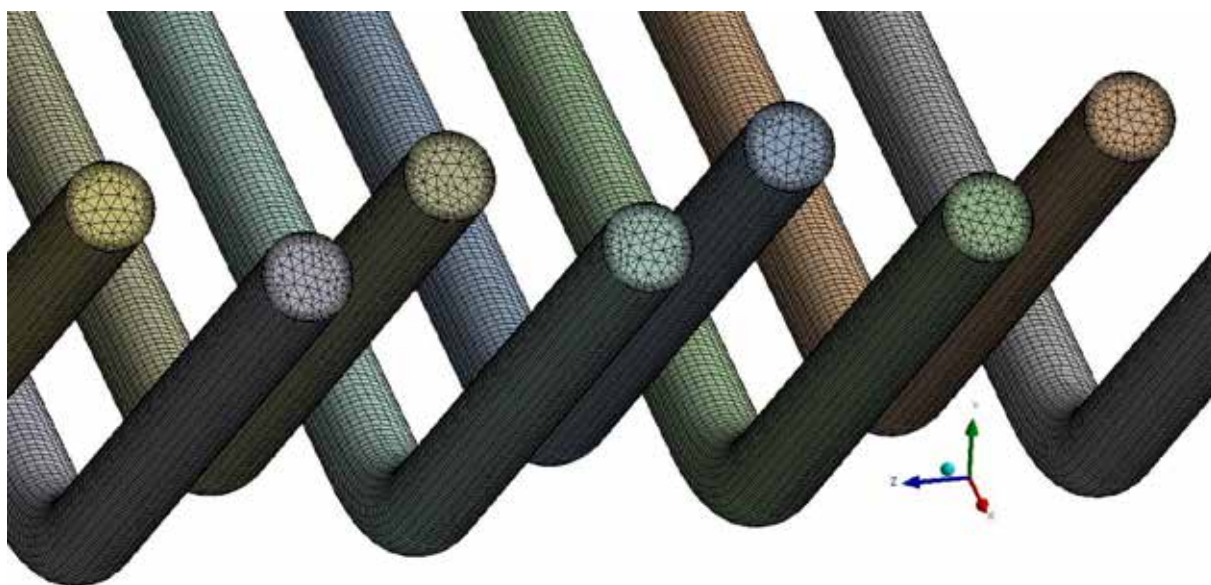


Рис. 4. Вид розрахункової сітки кип'ятильних труб котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) поблизу входу в барабан-сепаратор

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0. \quad (4)$$

Для моделювання турбулентного руху рідини, записані в формі Рейнольдса рівняння Нав'є-Стокса замикаються за допомогою k - ε моделі турбулентності:

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = C_{\varepsilon_1} \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho C_{\varepsilon_2} \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right), \quad (6)$$

де $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ – кінетична енергія турбулентних пульсацій;

$$\varepsilon = \nu_t \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \text{ – швидкість розсіювання}$$

турбулентної кінетичної енергії;

В роботі використані так звані масштабовані пристінні функції (Scalable Wall Function). Використання таких функцій ставить за мету подолання одного з основних недоліків підходу до стандартних функцій стінки. Основна ідея підходу масштабованих функцій стінки полягає в тому, щоб обмежити значення y^* , що використовується в логарифмічному законі течії в приміжовому шарі, мінімальним значенням, що знаходиться на перетині між логарифмічним і лінійним профілем біля стіни [13]. Тому всі точки сітки, які знаходяться за межами в'язкого підшару, і всі невідповідності дрібної сітки відсіюються.

Залежність для розрахунку турбулентної в'язкості має вигляд:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (7)$$

де C_μ – константа, а k і ε – кінетична енергія турбулентних пульсацій і швидкість їх дисипації відповідно.

Розрахунок дискретної фазової траєкторії здійснюється в Лагранжевому формулюванні, що включає дискретну фазову інерцію, гідродинамічний опір і силу тяжіння як для стаціонарних, так і для нестаціонарних течій. Лагранжева дискретна фазова модель в ANSYS-CFX слідує підходу Ейлера-Лагранжа. Пара розглядається як суцільне середовище шляхом вирішення рівнянь Нав'є-Стокса, тоді як дисперсна фаза вирішується шляхом відстеження великої кількості крапель через розрахункове поле потоку.

Для подальшої роботи ANSYS-CFX потрібно задатися відривним діаметром бульбашки пари, який можна обчислити з емпіричної залежності:

$$R \approx \frac{\sigma \sin \theta}{\rho' w'^2}, \quad (8)$$

де σ – сила поверхневого натягу рідини, Н/м; θ – кут змочування, рад; ρ' – густина рідини на лінії насичення, кг/м³; w' – швидкість спливання бульбашок, м/с.

Граничні умови. В якості граничних умов на стінках труб задавалась осереднена температура стінок паливни (рис. 5а), оскільки з-за обмежень ANSYS Student не є можливим задати густину теплового потоку на ділянках труб (рис. 5б).

Для визначення другої граничної умови, а саме швидкості в контурі циркуляції автори задавались середніми швидкостями води на вході в труби панелі і за допомогою Нормативного методу [11] визначили залежність опору опускної частини контуру і корисного напору в підйомній ланці від витрати води на вході в опускні труби (рис. 6). Звідки визначена дійсна витрата робочого тіла в екранних трубах і швидкість, що в якості граничних умов на вході потоку в нижній роздатковий колектор задавалась у CFD-моделі. Таким чином, дійсна швидкість циркуляції в контурі становить 0,485 м/с.

Обговорення отриманих результатів.

В якості основних результатів при розрахунках за допомогою CFD-моделі є середній об'ємний паровміст (Vapour. Volume fraction) і середня швидкість пароводяної суміші (Vapour. Velocity). Ці дані будуть використовуватись в подальших розрахунках термонапруженого стану барабана котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Розподіл об'ємного паровмісту і швидкості пароводяної суміші вздовж труб представлено на рис. 7а, б. Як свідчить рис. 7а, об'ємний паровміст в трубах постійно зростає і на виході з труби становить 0,861. Швидкість пароводяної суміші навпаки, є майже незмінною, оскільки вода в процесі руху вздовж екранних труб випаровується і її швидкість зменшується, а пара генерується і її швидкість збільшується.

Коректність отриманих при обчислювальному експерименті даних контролювалась аналітичним розрахунком, що виконувався за допомогою Нормативного методу [11]. Це реалізовано в роботі процедура верифікації моделі. Цифрами на рис. 7 позначено номери окремих ділянок труб, на яких аналітично обчислено середній об'ємний паровміст. Середній об'ємний паровміст на кожній ділянці обчислювався за формулою:

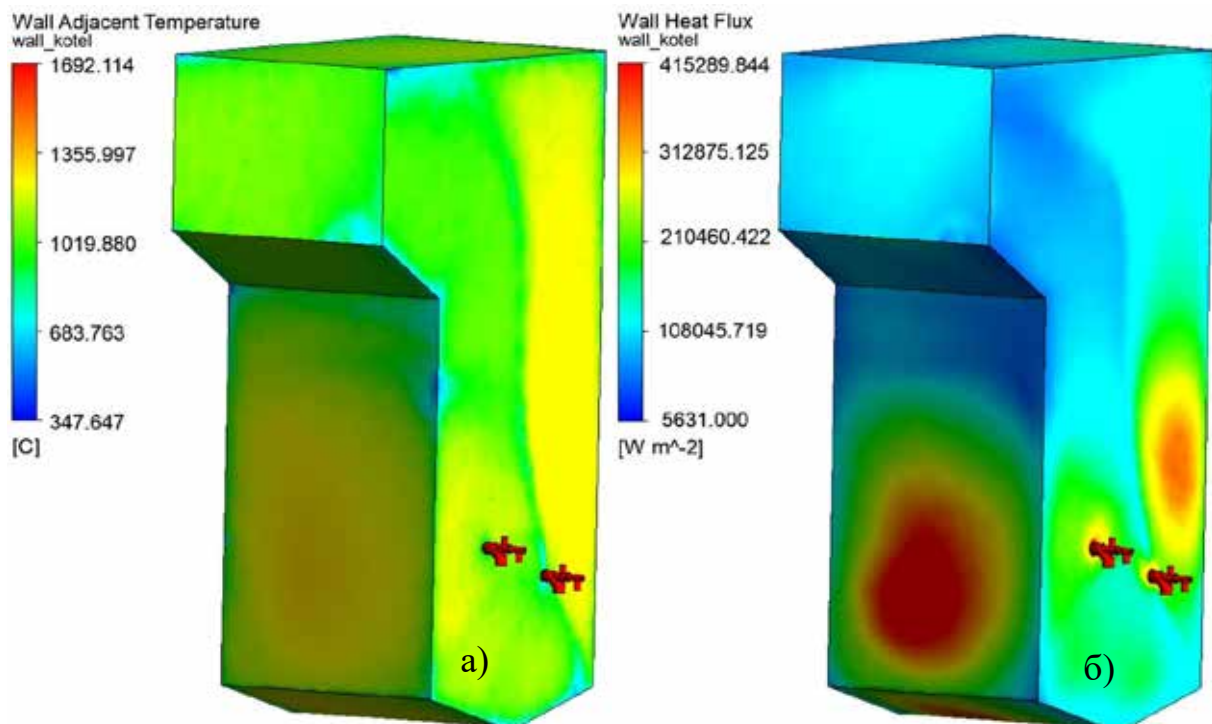


Рис. 5. Розподіл температур (а) та теплових потоків (б) на поверхні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)

$$\beta = \left(1 + \frac{1 - \bar{x}}{\bar{x}} \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{-1}, \quad (9)$$

де ρ'' і ρ' – густина води і пари відповідно, що визначаються в залежності від тиску в барабані; $\bar{x}$ – середній масовий паровміст:

$$\bar{x} = \frac{Q}{rG}, \quad (10)$$

де r – питома теплота пароутворення, Q – теплове навантаження на ділянці труб, що залежить від середнього питомого теплове навантаження радіаційних поверхонь паливні, яке в свою чергу визначено за допомогою Нормативного методу [11] і G – витрата води в панелі труб, що екранують паливню. Визначається за допомогою значення дійсної швидкості циркуляції в контурі (рис. 6).

Числові значення середнього об'ємного паровмісту приведені на рис. 7а у рамках поблизу позначення номеру ділянки чорним кольором.

Червоним кольором приведені осереднені по об'єму кожної ділянки значення Vapor. Volume fraction які відповідають об'ємному паровмісту з CFD-моделі. Як свідчить рис. 6а свідчить, значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений аналітично за [11] знаходяться в межах від 9 до 18%.

Аналіз рис. 6 також свідчить, що розподіл парових пузирів по висоті кип'ятильних труб не є постійним – в області активного горіння (рис. 4б) створюються умови погіршеного теплообміну, відбувається інтенсивне випаровування води і заповнення труб парою. В області розташування циркуляційних зон димових газів з меншою температурою (в верхніх кутах паливні) створюються умови поверхневої конденсації води і ступінь сухості пари зменшується. Такі дані можна отримати тільки за допомогою комп'ютерного моделювання.

Висновки. Проведені розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

- моделювання дозволило проаналізувати динаміку генерації пари кип'ятильних трубах контуру природної циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) в умовах нерівномірності поля температур на бічних стінках котла і визначити параметри пароводяної суміші на виході з кип'ятильних труб;

- результати верифікації свідчить, що значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений за аналітичною методикою знаходяться в межах від 9 до 18%. Такий результат викликаний як припущеннями аналітичної методики так і обмеженнями студентської версії ANSYS;

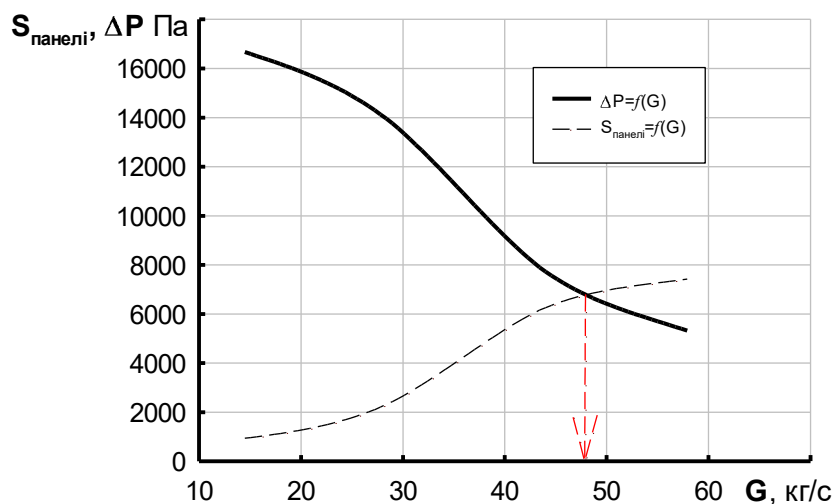


Рис. 6. Залежність опору опускної частини контуру ΔP і корисного напору $S_{\text{панелі}}$ підйомної ланки труби від швидкості води на вході в опускні труби

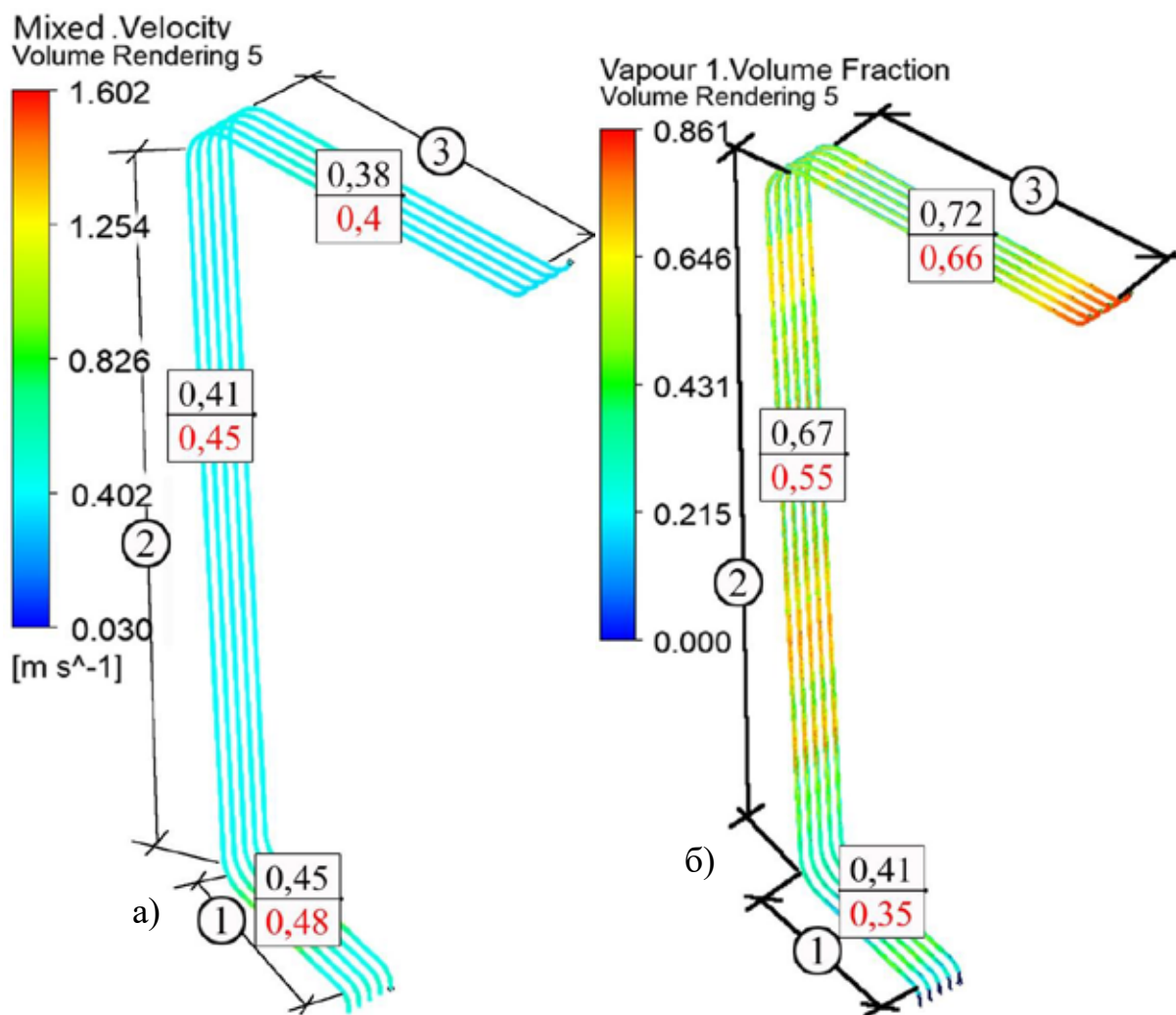


Рис. 7. Середній об'ємний паровміст (а) і середня швидкість пароводяної суміші (б) в моделі труб, що екранують паливню

– визначена дійсна витрата робочого тіла в екранних трубах і швидкість, що в якості граничних умов використана в наступних роботах по моделюванню процесів сепарації пари в барабан-сепараторі котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) та при моделюванні його термонапруженого стану.

Вплив інших факторів, а саме тип і конструкція пальників, що формують різну структуру факела, що змінює умови тепловіддачі і геометрія паливни від якої залежить розподіл температур і руху газів будуть досліджені в подальших роботах.

Список літератури:

1. Tawfeic S.R. Boiler Drum-Level Modeling. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Faculty of Engineering*. 2013. Vol. 41. No. 5. P. 1812–1829 DOI: 10.21608/jesaun.2013.114911
2. Wen Tan, Horacio J. Marquez, Tongwen Chen, Jizhen Liu. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit. *Journal of process control*. 2005. Vol. 15. P. 883–891 DOI:10.1016/j.jprocont.2005.03.007.
3. M.H. Zhang, K.W. Chu, F. Wei, A.B. Yu. A CFD–DEM study of the cluster behavior in riser and downer reactors. *Powder Technology*. 2008. Vol. 184. Issue 2. P. 151–165 DOI:10.1016/j.powtec.2007.11.036.
4. H.E. Emara-Shabaik, M.A. Habib, I. Al-Zaharna. Prediction of risers tubes temperature in water tube boiler. *Applied mathematical modeling*. 2008. Vol. 33. Issue 3. P. 1323–1336 DOI:10.1016/j.apm.2008.01.015.
5. Нікуліна О.М., Северин В.П., Бубнов А.І., Кондратов О.М. Розробка нелінійної моделі парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2022. № 1(7). С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.01.04>
6. Jonas Eborn, Karl Johan Åström. Modeling of a Boiler Pipe with Two-Phase Flow Instabilities. 2000. *Modelica Workshop 2000 Proceedings*. pp. 79–88.
7. H. Tummescheit, J. Eborn, F. Wagner. Development of a Modelica base library for modeling of thermo-hydraulic systems. 2000. *Modelica 2000 Workshop Proceedings*. pp. 1–13.
8. H. T. Liu, H. Koçak, S. Kakaç. Dynamical analysis of pressure-drop type oscillations with a planar model. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995. Volume 21. Issue 5. P. 851–859 [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00012-M](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00012-M).
9. Paweł Ocłoń, Marzena Nowak, Stanisław Łopata. Simplified Numerical Study of Evaporation Processes Inside Vertical Tubes. *Journal of Thermal Science*. 2014. Vol.23, No.2, P. 177–186 DOI: 10.1007/s11630-014-0693-7.
10. Черноусенко О.Ю., Рачинський А.Ю., Баранюк О.В. CFD моделювання паливни котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. Том 79 № 2. С. 138–149, DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.10>
11. Тепловий розрахунок котельних агрегатів. Нормативний метод. Москва / за ред. Кузнецова Н.В. Москва. Энергия, 1973. 296 с.
12. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. New-York, USA: ANSYS Inc, 2012.

Baranyuk O.V., Chernousenko O.Yu., Rachynskyi A.Yu., Pikenin O.O. MODELING OF THE NATURAL CIRCULATION CIRCUIT IN THE GM-50 BOILER (N-50-3.9-440GM)

The article is devoted to CFD-modeling of processes that occur during steam generation in the natural circulation circuit of the GM-50 boiler (N-50-3.9-440GM). The processes of steam generation in the boiler unit fuel affect the stable and efficient operation of the boiler unit as a whole, and their modeling in order to minimize research costs is relevant and has great practical significance. The purpose of the work is to determine the volumetric steam content and the velocity of the steam-water mixture at the outlet of the pipes shielding the GM-50 boiler fuel (N-50-3.9-440GM). To achieve the set goal, the thermal load on the side walls of the GM-50 boiler fuel (N-50-3.9-440GM) when burning natural gas in four standard GMG-5 burners was calculated using CFD-modeling methods in the free student version of ANSYS Student and analytically, using the Normative method. The actual flow rate of the working fluid in the screen tubes and the velocity, which was set as the boundary conditions at the flow inlet to the lower distribution manifold in the CFD model, were determined. Using the same analytical method, the average volumetric vapor content in individual sections of the natural circulation circuit tubes was determined. These data were used to verify the results of the numerical experiment. Since there is no reliable experimental data in the available literature, and CFD modeling after verification will allow obtaining local data on all the necessary thermodynamic parameters of the steam-water mixture. The verification results show that the deviation values of the CFD model calculations from the values of the average volumetric vapor content determined by the analytical method are in the range from 9 to 18%. This result is caused by both the assumptions of the analytical method and the limitations of the student version of ANSYS. The modeling allowed us to analyze the dynamics of steam generation in the boiler tubes

of the natural circulation circuit of the GM-50 (N-50-3.9-440GM) boiler under conditions of non-uniform temperature field on the side walls of the boiler and to determine the parameters of the steam-water mixture at the outlet of the boiler tubes. These data will be used in subsequent works on modeling the processes of steam separation in the drum-separator of the GM-50 (N-50-3.9-440GM) boiler and in modeling its thermally stressed state.

Key words: *evaporation, natural circulation, convective boiling, fuel station, boiler.*

Дата надходження статті: 10.07.2025

Дата прийняття статті: 25.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Бовсуновський О.А.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка
Національної академії наук України

ГРАНИЧНИЙ СТАН ВАЛОПРОВОДА ПАРОВОЇ ТУРБІНИ К-1100-60/1500-2М ПРИ НЕШТАТНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Стаття присвячена розробці методики визначення граничного стану валопровода парової турбіни з втомним пошкодженням типу тріщини при динамічному навантаженні в результаті виникнення короткого замикання на турбогенераторі. Відомі випадки катастрофічного руйнування парових турбін пов'язані головним чином з тривалим накопиченням розсіяного втомного пошкодження, подальшим розвитком тріщин різного виду і раптовим прикладанням динамічного крутного моменту. З'ясовано, що головними причинами цих руйнувань були нештатні режими роботи турбогенератора, а саме підключення турбогенератора до мережі з неточною синхронізацією, а також коротке замикання на турбогенераторі. Встановлено, що останнє за певних умов може зумовити інтенсивні крутильні коливання валопровода турбіни, достатні для його руйнування за наявності тріщини певного розміру. В роботі запропоновано методику оцінки критично небезпечних розмірів кільцевої, поперечної і радіальної тріщини, за яких коротке замикання на турбогенераторі призведе до руйнування валопровода турбіни К-1100-60/1500-2М. Методика оцінки критично небезпечних розмірів тріщини ґрунтувалась на розрахунках динамічних крутних моментів, які виникають на найбільш напружених ділянках валопровода турбіни в результаті короткого замикання на турбогенераторі і на визначенні коефіцієнтів інтенсивності напружень у тріщині, що знаходиться на цих ділянках. Найменша тріщина, для якої коефіцієнт інтенсивності напружень досягала в'язкості руйнування роторної сталі, вважалась критично небезпечною, тобто такою, що призведе до катастрофічного руйнування валопровода при короткому замиканні на турбогенераторі. З використанням запропонованої методики визначено критичні розміри кільцевої, поперечної і радіальної тріщини за різних її параметрів (розміри і місцезнаходження) у валопроводі парової турбіни К-1100-60/1500-2М в певному діапазоні в'язкості руйнування роторної сталі.

Ключові слова: вал турбіни, крутильні коливання, коротке замикання, критичний розмір тріщини, умови руйнування.

Постановка проблеми. Найбільш навантажені елементи парових турбін за тривалий час експлуатації зазнають інтенсивного термічного і механічного навантаження, в результаті дії якого виникають тріщини втоми, які, розвиваючись, можуть досягати критичних розмірів, що призводить до катастрофічного руйнування турбін. Разом з цим відкритим залишається питання про розмір критичних тріщин за тих чи інших видів динамічного навантаження, тобто, по суті, про досягнення турбіною граничного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коротке замикання (КЗ) на турбогенераторі може виникнути декілька разів за термін експлуатації турбіни, тому малоймовірно, що воно може розглядатись як причина втомного пошко-

дження валопровода турбіни. В той же час воно може зумовити виникнення короткочасного інтенсивного крутного моменту, який за певних умов [1, 2] здатний зруйнувати турбіну [3, 4]. Одна з цих умов, як зазначено в [4], є наявність у валопроводі турбіни розвинутих втомних тріщин. Характерним для раптового КЗ на турбогенераторі є поява знакозмінного електромагнітного моменту, що виникає як результат взаємодії магнітного потоку, зумовленого аперіодичними струмами статора, зі струмом незмінного напрямку в обмотці збудження [5]. У роботі [6] наведено приклади розрахунку електромагнітних моментів, що діють на бочку ротора турбогенератора ТГВ-200 при різних найбільш характерних випадках короткого замикання та

призводять до виникнення динамічних крутних моментів на валопроводі турбіни.

В дослідженнях [7, 8] розглядається вплив нештатних режимів роботи генератора, викликаних двофазними та трифазними короткими замиканнями на інтенсивність крутильних коливань валопроводів турбоагрегатів К-220-44-2М, К-325-23,5 та К-1100-60/1500-2М, а також оцінюється міцність найбільш навантажених ділянок валопроводів. Разом з тим питання про можливість валопровода турбіни, в якому в результаті тривалої експлуатації утворились тріщини різного типу, зберігати цілісність після КЗ на турбогенераторі залишається відкритим.

В той же час в багатьох роботах зазначаються випадки експлуатації турбоагрегатів з тріщинами. Так під час планово-попереджувального ремонту у 2021 р. в роторі середнього тиску турбіни К-200-130 блоку № 11 Бурштинської ТЕС, який мав напрацювання 297 тис. год при 1329 пусках з різних теплових станів, було діагностовано 8 кільцевих тріщин, що локалізувалися в зонах концентрації напружень, головним чином – у теплових канавках [9], зумовлені розвитком тріщин втоми протягом багатьох років. Одним із найбільш імовірних наслідків крутильних коливань валів турбін є виникнення кільцевих тріщин. Саме така тріщина була діагностована у роторі турбіни у м. Бесат [10]. Причинами виникнення тріщини було названо концентрацію механічних напружень і термічні напруження, що виникають внаслідок підготовки турбіни до пуску. Також кільцева тріщина, яка протягом десяти років експлуатації досягла приблизно 75% площі поперечного перерізу, була виявлена у роторі турбіни блоку ТЕС потужністю 60 МВт ТЕС [11], що свідчить про можливість досягнення кільцевою тріщиною значних розмірів у штатних режимах експлуатації турбіни і турбогенератора.

Внаслідок накопичення втомної пошкодженості від крутильних коливань ротора, вичерпання тривалої міцності, термічної втоми матеріалу, а також внаслідок корозії під напруженням відбувається зародження і розвиток поперечних тріщин на поверхні цільнокованих роторів, які можуть досягати значних розмірів [12].

Випадок тривалого розвитку радіальних тріщин у роторі середнього тиску, який призвів до катастрофічного руйнування турбоагрегата, зазначений у роботі [3]. Розмір найбільшої тріщини в момент руйнування досяг 350 мм.

Однією з ключових особливостей розвитку тріщини у циліндричних тілах при динамічному кру-

ченні є взаємодія між поверхнями тріщини [13]. Ця взаємодія в свою чергу є функцією амплітуд циклічного крутного моменту (при низькій амплітуді коефіцієнта інтенсивності напружень циклічного ріст тріщини генерує більш грубу поверхню руйнування). Загалом висота і періодичність нерівностей поверхонь тріщини залежать від прикладеного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), геометрії зразка та властивостей матеріалу. Механічна взаємодія між поверхнями тріщини зменшує коефіцієнт інтенсивності напружень при крученні, а саме

$$K_{eff} = K_{III} - K_{fric},$$

де K_{III} – КІН без врахування взаємодії поверхонь тріщини; K_{fric} – КІН тертя, який визначається взаємодією поверхонь тріщини; K_{eff} – ефективний КІН, який враховує тертя між поверхнями тріщини.

Головною проблемою при такому підході є визначення достовірного значення ефективного КІН. Для вирішення цієї проблеми в роботах [14, 15] було запропоновано іншу характеристику росту тріщини при циклічному крученні: інтенсивність пластичної деформації. Було показано, що вона забезпечує унікальний опис поведінки росту тріщини за умови, що середнє напруження зменшує тертя та зчеплення між поверхнями тріщини.

Окрім наведених вище факторів, які впливають на ріст тріщини, має місце вплив так званого закриття тріщини [16]. Це явище було досліджено на зразках з кільцевим надрізом з високоміцної та низькоміцної сталі при чистому циклічному крученні та комбінованому навантаженні (циклічне кручення плюс статичне осьове навантаження).

Постановка завдання. Метою статті є створення методики оцінки і власне оцінка небезпечних розмірів кільцевої, поперечної і радіальної тріщини, за яких КЗ на турбогенераторі призведе до руйнування валопровода турбіни К-1100-60/1500-2М.

Виклад основного матеріалу. Дослідження крутних моментів у найбільш навантажених ділянках валопровода турбіни К-1100-60/1500-2М виконані на основі результатів розрахунку його крутильних коливань після КЗ на турбогенераторі [8]. Розрахунки виконані із застосуванням програмних пакетів, розроблених в Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України і АТ «Турбоатом».

Розрахункова схема валопровода турбіни К-1100-60/1500-2М наведена на рис. 1, де РВТ – ротор високого тиску; РНТ – ротор низького тиску; ТГ – турбогенератор.

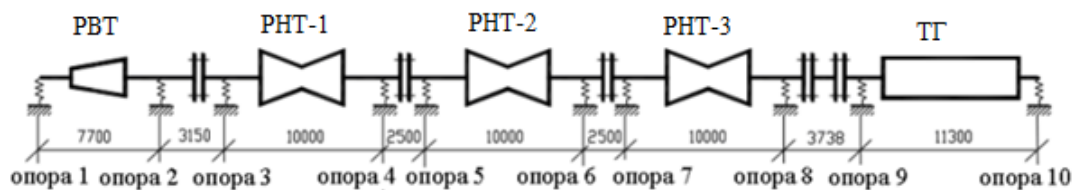


Рис. 1. Розрахункова схема валопровода турбіни К-1100-60/1500-2М [8]

Були визначені часові залежності крутних моментів у шийках РНТ-1, РНТ-2 і РНТ-3 зі сторони ТГ за період часу 0,1 сек. В табл. наведено амплітудні значення напружень у відповідних шийках роторів (зовнішній діаметр шийок складає 620 мм).

Таблиця 1

Амплітудні значення крутних моментів і напружень у шийках валопровода

Шийка РНТ	Номер амплітуди	Крутий момент, МН·м	Напруження τ_N , МПа
1	1	7,6	162,4
	2	5,0	106,9
2	1	10,0	213,7
	2	2,5	53,4
	3	6,0	128,2
3	1	17,0	363,3
	2	5,0	106,9
	3	4,0	85,5
	4	7,0	150,0
	5	6,0	128,2
	6	10,0	213,7
	7	1,0	21,4
	8	5,0	106,9
	9	3,0	64,1

Методика розрахунку коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) полягала у наступному. При крученні валу (КІН) для кільцевої тріщини розраховувався за наступним рівнянням [17]

$$K_{III} = \frac{\tau_N}{\beta^3} g(\beta) \sqrt{0,5\pi D \beta (1-\beta)}, \quad (1)$$

де τ_N – номінальні напруження N -го циклу навантаження; τ_N / β^3 – напруження в перерізі з тріщиною з врахуванням зменшення площі перерізу;

$$g(\beta) = \frac{3}{8} \left(1 + \frac{1}{2}\beta + \frac{3}{8}\beta^2 + \frac{5}{16}\beta^3 + \frac{35}{128}\beta^4 + 0,208\beta^5 \right);$$

$\beta = 1 - \frac{2a}{D}$; a – глибина тріщини; D – діаметр вала (рис. 2, а).

У випадку крайової поперечної тріщини з напівеліптичним фронтом (рис. 2, б) КІН визначався за рівнянням [18]

$$K_{III} = F_{III} \tau_N \sqrt{\pi a}. \quad (2)$$

Для випадку $a/b=0,6$ функція F_{III} в точках А і В фронту тріщини розраховувався відповідно за наступними рівняннями

$$F_{III} = 0,0144 + 2,77779\gamma - 0,41071\gamma^2;$$

$$F_{III} = 0,05895 + 6,1523\gamma - 20,15714\gamma^2 + 18,72222\gamma^3,$$

де $\gamma = a/D$.

У випадку радіальної крайової тріщини (рис. 2, в) КІН визначався за рівнянням [19]

$$K_{III} = F_{III} \tau_N \frac{\pi(D^4 - d^4)}{2\sqrt{2}D^3\sqrt{D}}, \quad (3)$$

де $F_{III} = 0,16923 + 1,86156\lambda - 2,88482\lambda^2 + 2,16221\lambda^3$; $\lambda = 2a/(D-d) < 1$; d – діаметр технологічного каналу (в розрахунках прийнято $d=0,115$ м).

Алгоритм розрахунку росту тріщини внаслідок крутильних коливань вала при КЗ на турбо-

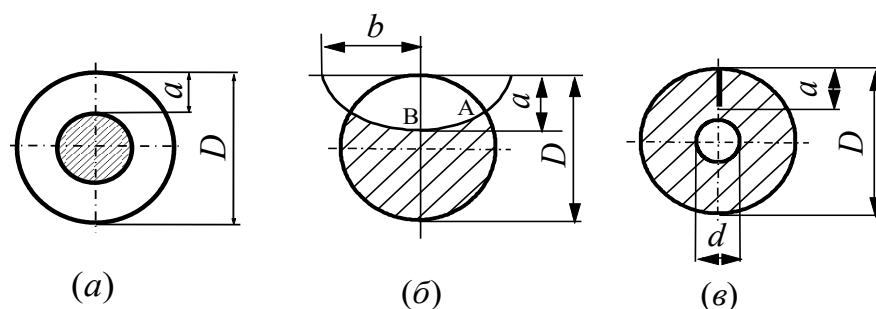


Рис. 2. Поперечний переріз вала з кільцевою (а), крайовою (б) і радіальною (в) тріщиною

генераторі показано на рис. 3, де a_0 – глибина тріщини перед КЗ; $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_N$ – амплітудні значення напружень, які виникають у досліджуваних ділянках валопровода турбіни в результаті КЗ (табл. 1); N – кількість циклів навантаження.

Алгоритм призначення початкового розміру тріщини a_0 є наступним. Задається мінімальне значення a_0 , «проганяється» через алгоритм і, якщо в результаті критичне значення тріщини не досягається, мінімальне значення збільшується на крок обчислень, після чого обчислення повторюються до тих пір, поки критичне значення розміру тріщини не буде знайдене. В даному випадку крок обчислень складає 0,01 мм, що є більш ніж достатнім для вирішуваної задачі.

Для кожного з циклів навантаження розраховується КІН за рівняннями (1–3) відповідно до виду тріщини. Ця величина КІН ($K_{III n}$) порівнюється з його пороговим значенням ($K_{III th}$) для роторної сталі. За умови $K_{III n} < K_{III th}$ тріщина не має можливості для росту. Якщо $K_{III n}$ перевищує порогове значення КІН для роторної сталі, тобто $K_{III n} \geq K_{III th}$, тріщина підростає на величину da_1 , яка визначається за кінетичною діаграмою руйнування, і набуває значення

$$a_1 = a_0 + da_1. \quad (4)$$

При наступному амплітудному значенні напруження, за якого виникають умови для росту тріщини, розрахунок проводиться з урахуванням зміни розміру тріщини, а саме

$$a_2 = a_1 + da_2. \quad (5)$$

В загальному випадку розмір тріщини на n -тому циклі навантаження розраховується наступним чином

$$a_n = a_{n-1} + da_n. \quad (6)$$

Якщо в процесі цих обчислень виконується умова $\Delta K_{III} < \Delta K_{III c}$, тобто тріщина не досягає критичного значення, її початковий розмір дещо збільшується і обчислення повторюються. Розрахунки продовжуються до виконання умови $\Delta K_{III} \geq \Delta K_{III c}$ ($\Delta K_{III c}$ – в'язкість руйнування), тобто коли матеріал досягає свого граничного стану, що безпосередньо передують руйнуванню. При цьому фіксується критичний розмір тріщини a_{cr} , а також розмір тріщини перед початком КЗ, який в результаті дії відповідного динамічного навантаження (див. табл.) призводить до руйнування. Позначимо її a_{0cr} і зазначимо, що саме вона є тим шуканим розміром тріщини, який визначається в рамках поставленої задачі. В подальшому будемо її називати небезпечним розміром тріщини.

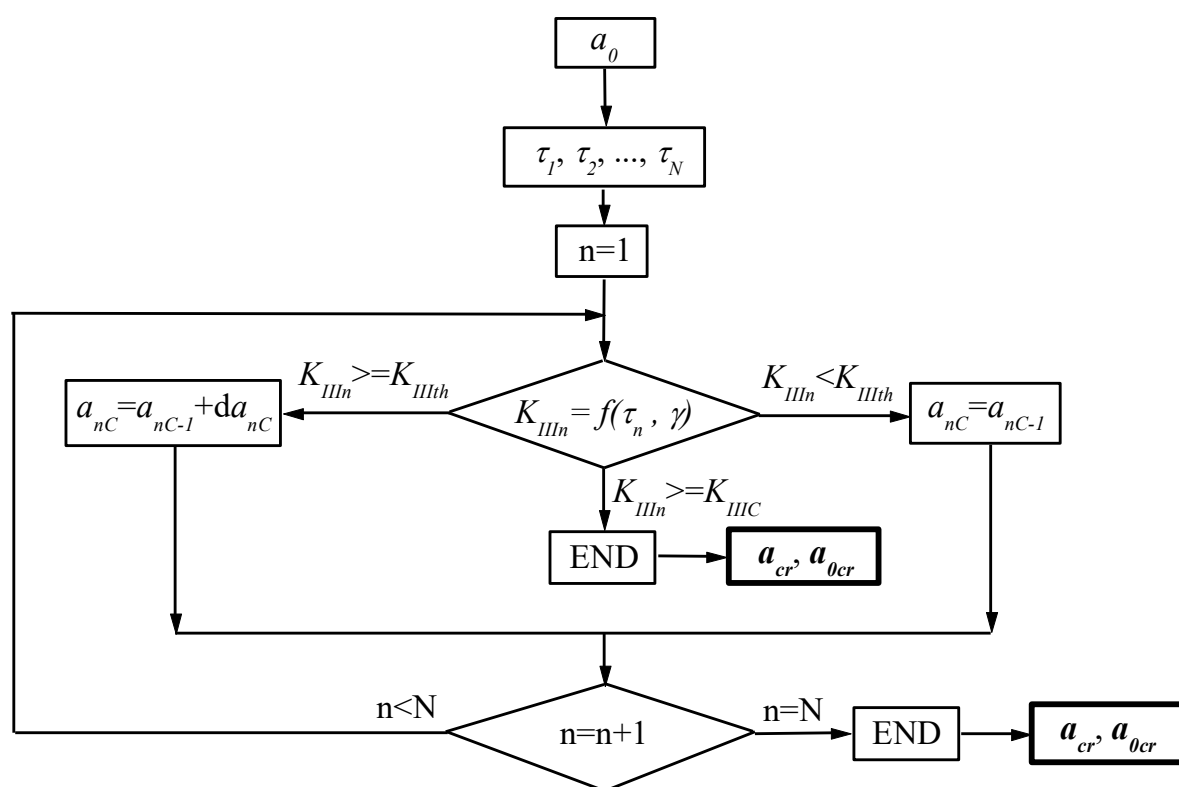


Рис. 3. Блок-схема алгоритму розрахунку росту тріщини

Для розрахунку росту тріщини було використано рівняння Паріса [20]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{III})^m, \quad (7)$$

де C і m – емпіричні параметри; ΔK_{III} – розмах КІН.

В одній з небагатьох робіт, присвячених експериментальному дослідженню характеристик тріщиностійкості сталі при циклічному крученні [13] наведено кінетичну діаграму руйнування циліндричних зразків зі сталі AISI 4140 при нормальній температурі. Однак, оскільки сталь AISI 4140 дещо відрізняється за хімічним складом від сталі P2M і зважаючи на суттєвий вплив високої температури на характеристики тріщиностійкості, в подальших розрахунках було використано результати експериментального дослідження розвитку тріщини за взаємодії повзучість–втома в компактних зразках із роторної сталі P2M за температури 550°C [21]. Дані для сталі AISI 4140 були використані для оцінки в'язкості руйнування мало легованої сталі при крученні.

Залежність швидкості росту тріщини від розмаху КІН для цієї сталі було апроксимовано рівнянням (7). Експериментальні дані для більш точної апроксимації було представлено трьома функціями (рис. 4), а саме: $C=1,8744 \cdot 10^{-17}$, $m=7,112$ ($K_{I_{max}} \leq 30$ МПа м^{1/2}), $C=1,9661 \cdot 10^{-11}$, $m=3,036$ ($30 < K_{I_{max}} \leq 48$ МПа м^{1/2}), $C=9,1296 \cdot 10^{-23}$, $m=9,777$ ($K_{I_{max}} > 48$ МПа м^{1/2}). При цих параметрах тріщина вимірюється в мм.

Перерахунок КІН для тріщини нормального відриву на тріщину поперечного зсуву здійснювався на основі емпіричної залежності [22]

$$K_{III} = K_I \sqrt{\frac{1-\mu}{1+\mu}}, \quad (8)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона. Для роторної сталі $\mu=0,27$, отже $K_{III}=0,76K_I$. Порогове значення КІН для роторної сталі в розрахунках було прийнято $K_{IIIth}=8$ МПа м^{1/2}, критичне значення варіювалось в діапазоні $K_{IIIc}=60\text{--}150$ МПа м^{1/2} через відсутність цих даних в літературі і через суттєвий вплив на цю характеристику температури.

Необхідно зауважити, що такий підхід є дещо спрощеним, оскільки не бере до уваги фактор контактної взаємодії поверхонь тріщини при крученні (див. вступ) через його невизначеність для розглядуваних умов навантаження. Неврахування КІН тертя, який визначається тертям поверхонь тріщини, дещо завищує ефективний КІН. За таких умов оцінка небезпечного розміру тріщини є консервативною.

На рис. 5–7 наведено небезпечний розмір відповідно кільцевої, крайової поперечної і крайової радіальної тріщини, за якого в ній досягається критичне значення КІН при КЗ на турбогенераторі, при різних значеннях в'язкості руйнування роторної сталі.

Найменший розмір небезпечної тріщини очікувано спостерігається у випадку її знаходження у шийці РНТ-3, оскільки ця ділянка валопровода зазнає найбільш інтенсивного крутного моменту при КЗ на турбогенераторі (див. табл. 1). Відповідно через значно менше навантаження розмір небезпечної тріщини у шийках РНТ-2 і РНТ-1 є значно більшим. Тому подальший аналіз зосереджений на небезпечних розмірах тріщин різного виду саме у шийці РНТ-3.

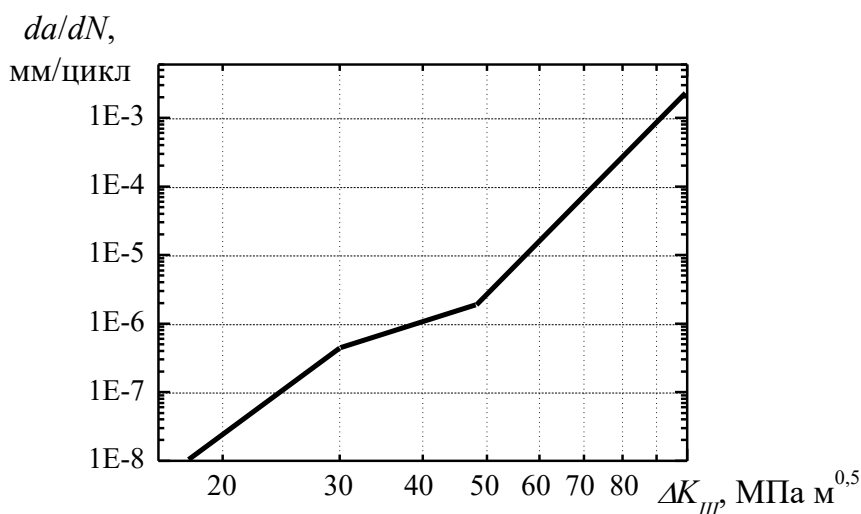


Рис. 4. Кінетична діаграма руйнування роторної сталі при крученні за температури 550°C

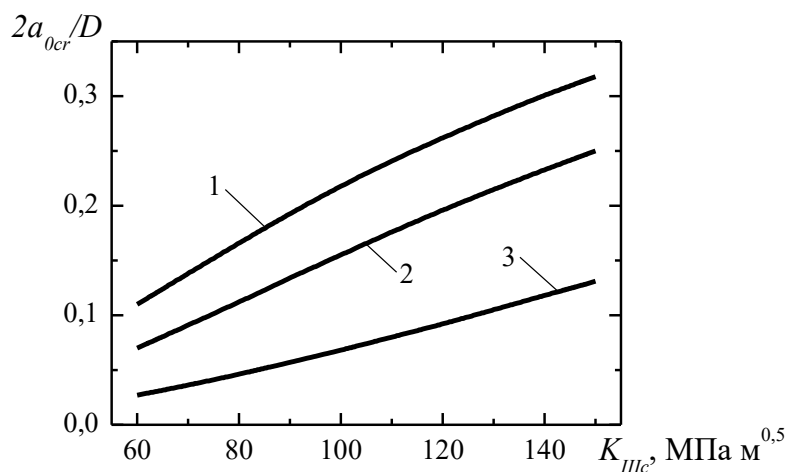


Рис. 5. Залежність небезпечного значення відносної глибини кільцевої тріщини у шийці РНТ-1 (1), РНТ-2 (2) і РНТ-3 (3) від в'язкості руйнування роторної сталі

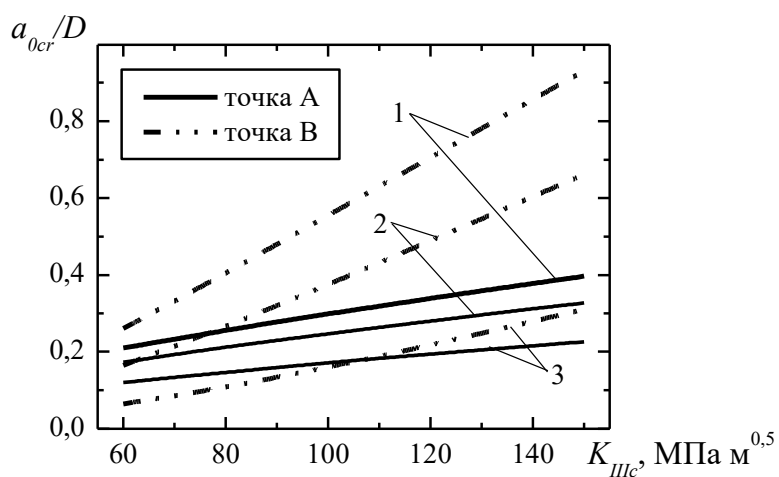


Рис. 6. Залежність небезпечного значення відносної глибини крайової поперечної тріщини у шийці РНТ-1 (1), РНТ-2 (2) і РНТ-3 (3) від в'язкості руйнування роторної сталі

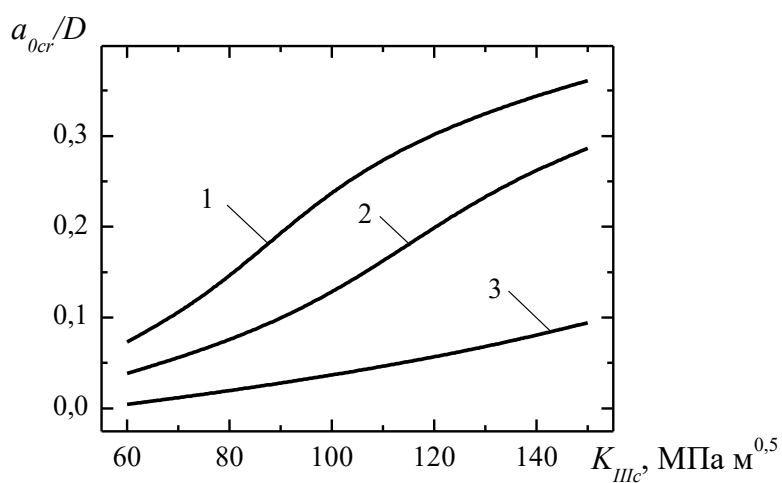


Рис. 7. Залежність небезпечного значення відносної глибини крайової радіальної тріщини у шийці РНТ-1 (1), РНТ-2 (2) і РНТ-3 (3) від в'язкості руйнування роторної сталі

В дослідженому діапазоні в'язкості руйнування роторної сталі небезпечний розмір кільцевої тріщини складає в абсолютних величинах $a=8,3\ldots 40,4$ мм, у відносних величинах – $2a/D=0,027\ldots 0,131$, крайової поперечної тріщини – $a=39,4\ldots 140,3$ мм, $2b=131,3\ldots 467,7$ мм і $a/D=0,064\ldots 0,226$, крайової радіальної тріщини – $a=2,8\ldots 58,6$ мм і $a/D=0,005\ldots 0,094$. Якщо в'язкість руйнування в цих розрахунках збільшувалась у 2,5 рази, то небезпечний розмір кільцевої тріщини збільшився у 4,9 рази, поперечної – у 3,6 раз, радіальної – у 21 раз. Таким чином оцінка небезпечного розміру радіальної тріщини є суттєво залежною від в'язкості руйнування. Значно менш залежною, але доволі відчутною, є така залежність для двох інших типів тріщин. Тому результати представлених досліджень дозволяють виконати лише консервативну оцінку небезпечного розміру тріщини, яка спирається на нижню границю дослідженого діапазона значень в'язкості руйнування роторної сталі.

З огляду на ці результати, найбільш небезпечною з точки зору цілісності валопроводу при КЗ на турбогенераторі є радіальна тріщина. Непрямим підтвердженням цього висновку є руйнування ротора середнього тиску на паровій турбіні у м. Галатін [3], яке сталося в результаті розвитку саме радіальних тріщин. Як свідчить ряд досліджень [23, 24] радіальні тріщини розвиваються головним чином в умовах циклічної деформації кручення. Такі умови навантаження валопровода парової турбіни виникають при нештатних режимах роботи турбогенератора, зокрема при його підключенні до мережі з неточною синхронізацією. Кількість підключень турбогенератора до мережі є одним з ресурсних параметрів (за час експлуатації турбіни – до 2 тисяч).

Розмір небезпечної кільцевої тріщини є дещо більшим, ніж радіальної. Разом з тим з огляду на те, що існує багато причин для виникнення і розвитку кільцевих тріщин (термічні напруження, згинальні і крутильні коливання, концентрація напружень тощо), внаслідок чого саме вони найчастіше розвиваються у валопроводах турбін, зазначені небезпечні розміри тріщини не є такими, які можуть дозволити експлуатацію турбіни після її діагностування. Цей результат може слугувати виправданням існуючої практики механічного видалення кільцевої тріщини в процесі ремонту роторів відразу після її виявлення.

Особливістю поперечної тріщини є нерівномірність розподілу КІН вздовж її фронту (рис. 6). Тому оцінку небезпечного розміру тріщини виконували ґрунтуючись на розрахунках КІН в точках А і В фронту тріщини. За менш інтенсивного навантаження (шийки РНТ-1 і РНТ-2) небезпечний розмір тріщини визначається значенням КІН в точці А. Специфіка навантаження шийки РНТ-3 зумовлює особливість визначення небезпечного розміру тріщини, а саме в нижній частині діапазону значень в'язкості руйнування розмір тріщини визначається за розрахунком КІН в точці В, а у верхній – за розрахунком КІН у точці А. Порівняння небезпечних розмірів поперечної, радіальної і кільцевої тріщини дозволяє зробити висновок, що поперечна тріщина є найменш небезпечною при КЗ на турбогенераторі.

Висновки. Запропоновано методику розрахунку небезпечного розміру кільцевої, поперечної і радіальної тріщини, за якого коротке замикання на турбогенераторі призведе до руйнування валопровода парової турбіни. Методика застосована для визначення умов руйнування валопровода парової турбіни К-1100-60/1500-2М при короткому замиканні на турбогенераторі.

Однією з таких умов є найбільша навантаженість відповідної ділянки валопровода при його динамічному навантаженні. Такою ділянкою для турбіни К-1100-60/1500-2М є шийка валопровода турбіни між ротором низького тиску (РНТ-3) і турбогенератором. Другою умовою є локація тріщини на цій ділянці. Третьою умовою є досягнення тріщиною критичних розмірів.

Небезпечні розміри трьох типів тріщин визначені в широкому діапазоні в'язкості руйнування роторної сталі через невизначеність цієї характеристики в умовах циклічного кручення і при високій температурі. Консервативний розрахунок параметрів тріщин, тобто за найменшого дослідженого значення в'язкості руйнування роторної сталі і без врахування впливу взаємодії поверхонь тріщин, дозволив оцінити параметри кільцевої ($a=8,3$; $2a/D=0,027$), поперечної ($a=39,4$; $2b=131,3$; $a/D=0,064$) і радіальної ($a=2,8$; $a/D=0,006$) тріщини.

Уточнення результатів оцінки умов руйнування валопровода парової турбіни К-1100-60/1500-2М при короткому замиканні на турбогенераторі можливе за умови визначення в'язкості руйнування роторної сталі при циклічному крученні з врахуванням впливу температури, масштабного фактора і тертя між поверхнями тріщини.

Список літератури:

1. Bovsunovskii A.P., Chernousenko O.Y., Shtefan E.V., Bashta D.A. Fatigue damage and failure of steam turbine rotors by torsional vibrations. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42, № 1. P. 108–113. DOI: 10.1007/s11223-010-9196-2
2. Shul'zhenko N.G., Gontarovskii P.P., Garmash N.G., Grishyn N.N. Torsional vibrations and damageability of turboset shaftings under extraordinary generator loading. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, № 2. P. 227–234. DOI: 10.1007/s11223-015-9652-0
3. Kramer L.D., Randolph D.D., Weisz D.A. Analysis of the tennessee valley authority, Gallatin unit no 2. Turbine rotor burst. *ASME-MPC Symp. on Creep-Fatigue Interaction: Proc. of Int. Scientific and Technical Symposium*. (New York, 1-4 September 1976). New York, 1976. P. 1–5.
4. Bovsunovskii A.P. Assessment of fatigue damage in steam turbine shafting due to torsional vibrations. *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43, № 5. P. 487–497. DOI: 10.1007/s11223-011-9318-5
5. Башта Д.А., Штефан Є.В., Куєвда В.П. Пошкоджувальність роторних валів турбоагрегатів. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2011. № 45. С. 14–20.
6. Куєвда В.П., Штефан Є.В., Куєвда Ю.В., Башта Д.А. Визначення динамічних крутних моментів, що діють на ротор турбогенератора ТГВ-200 при трифазних коротких замиканнях. *Енергетика та електрифікація*. 2011. № 8. С. 14–20.
7. Гармаш Н.Г. Дослідження напруженого стану валопроводів турбін при коротких замиканнях. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2015. № 15(1124). С. 141–145.
8. Гришин М.М., Зайцев Б.П., Морачковський О.К., Пащенко Ю.Г., Кантор О.Г. Динаміка системи роторів турбоагрегату потужністю 1100 МВт. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2019. № 3(1328). С. 55–60. DOI: 10.20998/2078-774X.2019.03.08
9. Черноусенко О.Ю., Риндюк Д.В., Пешко В.А. Тепловий та напружений стан ротора середнього тиску енергоблоку № 11 Бурштинської ТЕС. *Вісник НТУ «ХПІ»: Серія “Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування”*. 2022. № 1–2. С. 5–14. DOI: 10.20998/2078-774X.2022.01.01
10. Majid Yadavar Nikraves and Mojtaba Meidan Sharaf. Failure of a steam turbine rotor due to circumferential crack growth influenced by temperature and steady torsion. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. P. 296–311. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.03.020
11. Barella S., Bellogini M., Boniardi M., Cincera S. Failure analysis of a steam turbine rotor. *Engineering Failure Analysis*. 2011. Vol. 18, № 6. P. 1511–1519. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2011.05.006
12. Черноусенко О.Ю., Риндюк Д.В., Пешко В.А. Оцінка залишкового ресурсу та подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. 308 с.
13. Vaziri A., Nayeb-Hashemi H. The effect of crack surface interaction on the stress intensity factor in Mode III crack growth in round shafts. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005. Vol. 72, № 4. P. 617–629. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2004.03.014
14. Nayeb-Hashemi H., McClintock F.A., Ritchie R.O. Effects of friction and high torque on fatigue crack propagation in Mode III. *Metallurgical Transactions*. 1982. № 13. P. 2197–2204. DOI: 10.1007/BF02648390
15. Nayeb-Hashemi H., McClintock F.A., Ritchie R.O. Micro-mechanical modelling of mode III fatigue crack growth in rotor steels. *International Journal of Fracture*. 1983. Vol. 23. P. 163–185.
16. Tschegg E.K. Fatigue crack growth in high and low strength steel under torsional loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1985. Vol. 3. P. 157–178.
17. Tada H., Paris P.C., Irwin G.R. The stress analysis of crack handbook. 3rd ed. New York: ASME Press, 2000. 677 p.
18. Ismail A.E., Ariffin A.K., Abdullah S., Ghazali M.J., Daud R. Mode III stress intensity factors of surface crack in round bars. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 214. P. 192–196. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.214.192
19. Murakami Y. Stress intensity factors handbook. Vol. II. New York: Pergamon Press, 1987. 1013 p.
20. Broek D. The practical use of fracture mechanics. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1988. 522 p.
21. Shlyannikov V., Kosov D., Fedorenkov D. Size effect in creep–fatigue crack growth interaction in P2M steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2021. Vol. 44. P. 3301–3319. DOI: 10.1111/ffe.13557
22. Aliha M.R.M., Bahmani A., Akhondi Sh. Determination of mode III fracture toughness for different materials using a new designed test configuration. *Materials and Design*. 2015. Vol. 86. P. 863–871. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.033

23. Troshchenko V.T. Some peculiarities of fatigue crack growth at various stages of its development. *Strength of Materials*. 2003. Vol. 35, № 6. P. 545–561. DOI: 10.1023/B:STOM.0000013605.17083.b7

24. Abdi H., Nayeb-Hashemi H., Hamouda A.M.S., Vaziri A. Torsional dynamic response of a shaft with longitudinal and circumferential cracks. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2014. Vol. 6. 061011. DOI: 10.1115/1.4028609

Bovsunovsky O.A. LIMIT STATE OF THE STEAM TURBINE K-1100-60/1500-2M SHAFT AT ABNORMAL OPERATING MODE OF A TURBOGENERATOR

The article is devoted to the development of a method for determining the limit state of a steam turbine shaft assembly with fatigue damage of crack type under dynamic loading because of a short circuit in the turbogenerator. Known cases of catastrophic failure of steam turbines are mainly associated with the long-term accumulation of scattered fatigue damage, the subsequent development of cracks of various types and the sudden application of dynamic torque. It has been found that the main causes of these failures were abnormal operating modes of the turbogenerator, namely, the connection of the turbogenerator to the network with inaccurate synchronization, as well as a short circuit on the turbogenerator. It has been established that the latter, under certain conditions, can cause intense torsional vibrations of the turbine shaft assembly, sufficient for its destruction in the presence of a crack of a certain size. It has been proposed the methodology for assessing critically dangerous sizes of the circular, transverse and radial cracks, at which a short circuit on the turbogenerator will lead to the destruction of the K-1100-60/1500-2M turbine shaft assembly. The method for estimating the critical crack sizes was based on calculations of dynamic torques that arise in the most stressed sections of the turbine shaft assembly because of a short circuit on the turbogenerator, and on the determination of stress intensity factor in the crack located in these sections. The smallest crack for which the stress intensity factor reaches the value of fracture toughness for the rotor steel is considered critically dangerous, i.e. it leads to the shaft assembly catastrophic failure in the event of a short circuit on the turbogenerator. Using the proposed method, the critical sizes of the circular, transverse and radial cracks were determined for various crack parameters (sizes and locations) for the shaft assembly of the K-1100-60/1500-2M steam turbine in a certain range of the fracture toughness of the rotor steel.

Key words: turbine shaft, torsional vibrations, short circuit, critical crack size, failure conditions.

Дата надходження статті: 01.07.2025

Дата прийняття статті: 14.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Коценко О.А.

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

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В УПРАВЛІННІ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯМ ОСВІТНІХ ЗАКЛАДІВ

У статті здійснено комплексне дослідження ролі інформаційних технологій у підвищенні ефективності управління теплоспоживанням в освітніх закладах. Актуальність тематики зумовлена глобальними енергетичними викликами, високими тарифами на енергоносії, посиленням вимог до енергоефективності будівель, а також необхідністю адаптації освітньої інфраструктури до умов енергетичної нестабільності в Україні. Значна частина освітніх установ функціонує в будівлях із застарілими системами опалення та недостатнім рівнем термоізоляції, що спричиняє надмірне споживання теплової енергії, перевитрати бюджетних коштів і погіршення мікрокліматичних умов. У таких умовах інформаційні технології виступають як потужний інструмент забезпечення раціонального використання ресурсів, покращення керованості теплопостачанням і підвищення якості освітнього середовища.

У статті розглянуто основні типи IT-рішень, які застосовуються для збору, обробки, аналізу й візуалізації даних про теплоспоживання: сенсорні системи моніторингу, програмовані контролери, хмарні платформи, SCADA-системи, засоби машинного навчання, автоматизовані пристрої керування, цифрові інформаційні панелі. Окрему увагу приділено функціонуванню прогнозних моделей, які дозволяють адаптувати систему опалення до динамічних умов – температури зовнішнього середовища, розкладу занять, присутності людей у приміщеннях. Показано, що інтеграція IoT-рішень, аналітичного ПЗ та автоматизації дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління теплоспоживанням, що базується на даних і прогнозах.

У результаті аналізу сучасних наукових джерел і практичного досвіду застосування IT в енергоменеджменті виявлено переваги таких підходів: досягнення економії енергії до 30%, стабілізація температурного режиму в будівлях, зниження кількості технічних збоїв і покращення обслуговування. Розкрито виклики, що стримують широке впровадження цифрових рішень в Україні: обмеженість фінансових ресурсів, відсутність підготовлених кадрів, фрагментарність ініціатив, відсутність єдиних стандартів і нормативної бази. Запропоновано концепцію цифрової трансформації теплоспоживання в освіті, що передбачає поступове впровадження інтелектуальних технологій, підтримку з боку держави та розвиток компетентностей енергоменеджерів.

Результати дослідження мають прикладне значення для закладів загальної середньої, професійної й вищої освіти, органів місцевого самоврядування та фахівців у сфері енергоефективності. Вони можуть бути використані для створення цифрових платформ моніторингу, розробки регіональних програм оптимізації споживання енергоресурсів, а також як основа для подальших наукових досліджень.

Ключові слова: інформаційні технології, теплоспоживання, енергоменеджмент, освітні заклади, моніторинг, енергоефективність, автоматизація, аналітика даних, інтелектуальні системи.

Постановка проблеми. У зв'язку з актуалізацією завдань енергозбереження в освітній сфері, що зумовлена як загальноосвітніми тенденціями сталого розвитку, так і специфічною ситуацією в Україні (зокрема, військовими діями, дефіцитом енергоносіїв та високою вартістю енергоресурсів), проблема раціонального управління теплоспоживанням у закладах освіти постає як одна з першочергових. Значна частина об'єктів освітньої

інфраструктури зведена в період, коли вимоги до енергоефективності будівель не відповідали сучасним стандартам. Це призводить до високих тепловтрат, нерівномірного прогріву приміщень, нераціонального використання ресурсів і, як наслідок, до перевитрат бюджету, недостатнього комфорту для учнів і студентів, а в окремих випадках – до зривів навчального процесу через неможливість підтримання належного температурного режиму [1].

На сьогодні в Україні спостерігається недостатній рівень цифровізації систем управління енергоресурсами в освіті. Більшість процесів контролю теплоспоживання здійснюється вручну або за допомогою застарілих технологій, що не дозволяють своєчасно реагувати на зміни або виявляти аномалії в роботі теплових систем. Відсутність інтегрованих інформаційних рішень унеможливорює ефективний моніторинг, аналітику та автоматизоване управління тепlopостачанням. Крім того, часто відсутні єдині стандарти обліку, збору та обробки даних, що ускладнює управлінські рішення на рівні навчального закладу або місцевої влади.

Особливої ваги набуває проблема недоступності сучасних ІТ-рішень для більшості закладів освіти через обмежений фінансовий ресурс, а також відсутність кваліфікованих фахівців у сфері енергоменеджменту та цифрових технологій. У цьому контексті виникає необхідність комплексного підходу, що поєднує технічну модернізацію систем опалення, впровадження сучасних засобів автоматизації та цифрового аналізу даних, розробку локальних та регіональних платформ управління теплоспоживанням із можливістю інтеграції в ширші системи «розумного міста».

Таким чином, постає проблема не лише модернізації інфраструктури освітніх закладів, а й глибокої цифрової трансформації процесів управління теплоспоживанням. Це вимагає узгоджених дій на рівні державної політики, розробки відповідних нормативних документів, стимулювання інновацій у сфері енергоефективних технологій, а також розвитку компетентностей персоналу, здатного забезпечити ефективне використання ІТ у практиці енергозбереження в освіті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впродовж останніх років зростає науковий інтерес до проблеми енергоефективності в закладах освіти, особливо в контексті диджиталізації управлінських процесів. При цьому, значна кількість робіт українських та зарубіжних дослідників присвячена розробці й впровадженню ІТ-рішень для моніторингу та оптимізації теплоспоживання. Зокрема, у працях українських авторів розглядаються питання застосування енергоменеджменту у сфері освіти, обґрунтовуються переваги автоматизованих систем обліку теплової енергії, а також аналізуються результати впровадження смарт-систем керування кліматом у навчальних закладах.

У роботах зарубіжних учених акцент робиться на інтеграції Інтернету речей (IoT) та SCADA-

систем для збирання й аналізу енергетичних показників у будівлях, зокрема в університетських кампусах. Вони демонструють, що використання мережевих сенсорів і хмарних платформ значно підвищує точність та оперативність управлінських рішень у сфері теплоспоживання. Також досліджуються питання економічної доцільності впровадження таких рішень, їх окупності та впливу на вуглецевий слід установ [2, 3].

Окремий напрям досліджень стосується прогнозування теплоспоживання з використанням методів машинного навчання. Такі підходи дозволяють враховувати історичні дані, метеорологічні показники, розклад навчального процесу, поведінкові фактори учасників освітнього середовища. В роботах Дж. Чжан (J. Zhang), А. Кусяк (A. Kusiak) розроблено моделі, які дозволяють прогнозувати споживання теплової енергії з високим рівнем точності та адаптувати параметри системи опалення в режимі реального часу.

Незважаючи на значну кількість досліджень, на практиці в Україні ще не сформовано єдиного підходу до цифрового енергоменеджменту в освіті. Більшість проєктів носить пілотний характер або реалізується в межах окремих грантових ініціатив чи міжнародних організацій. Також відчувається брак міждисциплінарних досліджень, що поєднують інженерні, інформаційні та педагогічні аспекти теплоспоживання в контексті освітнього процесу.

Виходячи з цього, аналіз сучасних наукових джерел підтверджує перспективність інтеграції інформаційних технологій в управління теплоспоживанням, але водночас виявляє низку проблем і прогалин, які вимагають подальшого вивчення та систематизації. Актуальними залишаються питання ефективної візуалізації енергетичних даних для освітніх менеджерів, створення універсальних платформ управління, стандартизації підходів до моніторингу та розвитку професійної підготовки персоналу до роботи з такими системами.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження можливостей використання сучасних інформаційних технологій для підвищення ефективності управління теплоспоживанням в освітніх закладах, а також у формуванні науково обґрунтованих рекомендацій щодо впровадження цифрових рішень у практику енергоменеджменту освітнього сектору.

Виклад основного матеріалу. Застосування інформаційних технологій у сфері управління теплоспоживанням в освітніх закладах дозволяє

не лише скоротити витрати на енергоресурси, а й підвищити загальний рівень комфорту для учасників освітнього процесу, забезпечити відповідність сучасним екологічним стандартам і нормативам. Сучасні ІТ-рішення охоплюють широкий спектр технологій: від простих систем дистанційного контролю температури до комплексних інтелектуальних платформ, які об'єднують сенсори, пристрої автоматизації, аналітичні модулі та інтерфейси користувача [4–6].

Одним із ключових компонентів цифрового управління теплоспоживанням є системи збору та обробки даних. Вони базуються на технологіях Інтернету речей (IoT), що дозволяють у реальному часі отримувати інформацію про температуру повітря, рівень вологості, стан опалювального обладнання, відкритість вікон, кількість людей у приміщеннях. Зібрані дані передаються на сервер або хмарну платформу, де піддаються попередній фільтрації та аналізу з використанням алгоритмів машинного навчання або статистичної обробки. Це забезпечує можливість виявлення закономірностей, аномалій, прогнозування поведінки системи в майбутньому.

Іншим важливим елементом є модулі візуалізації даних та інформаційні панелі, що дозволяють адміністрації освітнього закладу легко інтерпретувати ключові показники ефективності. На основі таких панелей можна приймати оперативні рішення – наприклад, змінювати температурний режим, запускати або зупиняти подачу тепла, виявляти нераціональні витрати. Візуалізація є також важливим інструментом підвищення енергетичної грамотності персоналу та учнів, стимулюючи відповідальне ставлення до використання ресурсів [5].

Значну роль у системі управління відіграють автоматизовані пристрої керування – електронні клапани, програмовані термостати, контролери, які отримують сигнали з аналітичної платформи і без участі людини виконують команди з регулювання подачі тепла. Встановлення таких пристроїв особливо ефективно в умовах старих будівель з нерівномірним розподілом тепла. Вони дозволяють точно регулювати температуру в кожному приміщенні, залежно від його розташування, навантаженості, часу доби та інших параметрів.

Окремим напрямом є впровадження цифрових систем прогнозування, що дозволяють будувати моделі очікуваного теплоспоживання на основі відомих даних, метеопрогнозів, навчальних графіків. Такі прогностичні моделі дають змогу запобігати перевитратам, оптимізувати навантаження

на системи опалення, узгоджувати графіки подачі тепла з реальними потребами закладу. Водночас вони створюють передумови для інтеграції освітніх будівель у ширші системи енергетичних розрахунків на рівні міста або регіону.

Під час практичної реалізації, значна увага приділяється також питанням інформаційної безпеки, оскільки зростає ризик зовнішнього втручання у функціонування автоматизованих систем. Застосування шифрування, багаторівневої авторизації, резервного копіювання та кіберзахисту має бути невід'ємною частиною цифрових рішень для управління теплоспоживанням.

Практичні приклади свідчать, що впровадження інтелектуальних систем в управління опаленням дозволяє досягати економії енергії в межах 15–30%, залежно від технічного стану будівлі та рівня впроваджених технологій. Університети, які реалізували відповідні проєкти, також зазначають підвищення стабільності температурного режиму, зменшення кількості скарг від користувачів та покращення управлінських процесів у сфері енергетики.

Узагальнення основних ІТ-рішень у сфері управління теплоспоживанням представимо у вигляді Таблиці 1.

Успішна реалізація інформаційних технологій у сфері управління теплоспоживанням передбачає не лише технічне впровадження відповідних систем, а й створення нової організаційної моделі управління енергетичними ресурсами закладу. Одним з важливих напрямів є перехід від ізольованого впровадження окремих цифрових компонентів до побудови цілісної системи цифрового енергоменеджменту, що охоплює усі рівні прийняття рішень – від класної кімнати до міністерського управління. У цьому контексті інтеграція даних про теплоспоживання з іншими інформаційними потоками (наприклад, даними про споживання електроенергії, вентиляцію, відвідуваність, календар подій) дозволяє створити уніфіковану аналітичну екосистему для прийняття стратегічних і тактичних рішень.

Поява систем на базі штучного інтелекту (ШІ) відкриває нові горизонти для адаптивного керування теплоспоживанням. Такі системи можуть навчатися на основі історичних даних конкретного навчального закладу, враховувати унікальні архітектурні характеристики будівель, поведінкові особливості користувачів, погодні коливання. На відміну від традиційних моделей, які часто мають жорстко задані параметри, ШІ-алгоритми здатні самостійно виявляти складні залежності між

Основні інформаційні технології в управлінні теплоспоживанням освітніх закладів

Назва технології	Призначення	Прогнозування
Системи моніторингу (IoT)	Збір даних про температуру, вологість, присутність людей	Оперативне реагування, контроль умов
Аналітичні платформи	Аналіз історичних даних, виявлення аномалій	Оптимізація споживання, виявлення втрат
Прогностичні моделі	Побудова прогнозів теплоспоживання на основі різних факторів	Запобігання перевитратам, планування
Автоматизовані пристрої керування	Регулювання подачі тепла за допомогою термостатів, контролерів	Підвищення точності регулювання, економія
Хмарні сервіси	Централізоване зберігання й обробка даних, віддалений доступ	Масштабованість, доступність, інтеграція
Кіберзахист	Захист систем від зовнішнього втручання	Надійність роботи, безпека

змінними та оновлювати свої прогнози в режимі реального часу. Наприклад, гібридні нейромережі можуть одночасно аналізувати вплив кількох факторів (вологість, інсоляція, присутність, час доби) на потребу в теплі, забезпечуючи оптимальне навантаження на систему опалення без втручання оператора.

Не менш перспективним є впровадження децентралізованих архітектур управління, коли кожна будівля або навіть її окремі зони функціонують як самостійні «енергетичні вузли», здатні самостійно аналізувати ситуацію і приймати рішення щодо рівня обігріву. Такий підхід підвищує стійкість системи до збоїв і дозволяє локалізувати проблеми, не порушуючи роботи всієї інфраструктури. Використання edge-комп'ютингу (обробки даних на периферійних пристроях) дає змогу суттєво зменшити навантаження на центральні сервери, підвищити швидкість реагування і покращити інформаційну безпеку.

Ще одним напрямом розвитку є інтеграція систем теплоспоживання з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) – наприклад, сонячними колекторами або тепловими насосами. У цьому випадку IT-рішення відіграють ключову роль у балансуванні джерел енергії, прогнозуванні виробітку та оптимізації комутації між зовнішнім постачанням тепла і автономними генераторами. Особливої актуальності це набуває в умовах енергетичної нестабільності, коли можливість тимчасової автономної роботи освітніх закладів стає критично важливою для забезпечення безперервності навчального процесу.

Також слід відзначити роль цифрових технологій у плануванні та моделюванні реконструкції існуючих систем опалення. Використання Building Information Modeling дозволяє створити цифрові копії будівель, візуалізувати потоки енер-

гії, виявити «слабкі місця», що потребують термомодернізації, і розрахувати ефективність різних варіантів реконструкції до їх фактичного впровадження. Такий підхід мінімізує ризики неправильних рішень і сприяє економії коштів на етапі реалізації.

Варто наголосити на зростаючій ролі освітніх програм, спрямованих на формування енергетичної культури серед учасників освітнього процесу. Цифрові інформаційні панелі, мобільні додатки та інтерактивні платформи можуть використовуватись як навчальні інструменти, що демонструють у реальному часі споживання теплової енергії в класі, закликаючи до енергозбереження. Таким чином, інформаційні технології не лише підвищують ефективність управління, але й сприяють вихованню нової генерації свідомих споживачів енергії.

Не менш важливою є інтеграція цифрових рішень у систему управління на рівні об'єднаних територіальних громад. Розгортання єдиних платформ, що об'єднують дані з кількох закладів освіти, дозволяє муніципалітету ефективно розподіляти ресурси, планувати ремонти, оптимізувати закупівлі енергоносіїв. Більше того, цифрові інструменти можуть бути інтегровані з системами бюджетного моніторингу, що сприяє прозорості й підзвітності використання коштів.

У підсумку, впровадження IT у сфері управління теплоспоживанням є не лише технічним завданням, а й стратегічним процесом цифрової трансформації всієї освітньої системи. Його успіх залежить від узгоджених дій освітян, енергетиків, айті-фахівців, а також управлінських рішень на національному рівні. Подальші дослідження мають зосередитися на оцінці ефективності впроваджених рішень, формуванні методологій порівняльного аналізу, а також на створенні шабло-

нів для масштабованого розгортання ІТ-рішень в освітньому секторі України.

Отже, впровадження ІТ в управління теплоспоживанням має міждисциплінарний характер і потребує узгодженої співпраці фахівців у галузі енергетики, ІТ, управління освітою, безпеки та будівництва. Лише за умови системного підходу, належного фінансування та професійної підготовки кадрів можна досягти сталих результатів у підвищенні енергоефективності навчальних закладів.

Висновки. Впровадження інформаційних технологій в управління теплоспоживанням освітніх закладів є одним із ключових інструментів досягнення енергоефективності, фінансової стабільності та екологічної безпеки. Аналіз наукових джерел, а також практичних прикладів підтверджує ефективність інтеграції таких ІТ-рішень, як системи моніторингу, автоматизовані пристрої керування, аналітичні модулі та прогностичні моделі.

Проблема полягає не лише у технічній модернізації об'єктів освітньої інфраструктури, а й у цифровій трансформації всієї системи управління енергоресурсами. Безпосереднє залучення ІТ дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління, що ґрунтується на даних, аналітиці та прогнозуванні. Це вимагає не лише впро-

вадження відповідних технологій, а й розбудови інституційної спроможності освітніх закладів до їх використання.

Реалізація подібних ініціатив повинна супроводжуватись підвищенням кваліфікації персоналу, створенням локальних стратегій цифрової енергетики, а також розробкою нормативної бази, яка сприятиме масовому впровадженню ІТ-рішень у сфері енергоменеджменту. Необхідно також адаптувати такі рішення до специфіки навчального середовища, враховуючи нерівномірне завантаження приміщень, різні архітектурні умови та обмеження бюджету.

З урахуванням наявних тенденцій, вітчизняний освітній сектор має значний потенціал для переходу до більш сталого й технологічно просунутого моделю управління тепловими ресурсами. Подальші дослідження доцільно зосередити на адаптації хмарних сервісів, стандартизації даних, створенні національних платформ енергомоніторингу, а також на вивченні соціального ефекту від цифровізації опалення – зокрема, впливу на поведінку користувачів та освітні результати.

Загалом, інформаційні технології в енергоменеджменті закладів освіти – це не лише про економію ресурсів, а й про інновації, які формують нову культуру енергоспоживання та сприяють сталому розвитку освітньої галузі.

Список літератури:

1. Jindal A., Kumar N., Rodrigues J. A heuristic-based smart HVAC energy management scheme for university buildings. *IEEE Trans. Industrial Informatics*, 2018. DOI: 10.1109/TII.2018.2802454
2. Laporte J.P.; Cansino J.M. Energy Consumption in Higher Education Institutions: A Bibliometric Analysis Focused on Scientific Trends. *Buildings* 2024, № 14. 323 pp. <https://doi.org/10.3390/buildings14020323>
3. Pinto Oliveira D.C., Pimentel Filho M.C., Alencar Freitas A.A. Energy Efficiency Analysis in Buildings of a University Campus Using the Procel RTQ-C. In *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2021, São Paulo, Brazil, 15–18 August 2021*. 710–715 pp.
4. Popescu L. L., Popescu R. S. Optimizing Energy Efficiency: Dynamic Numerical Simulation for Educational Buildings. 2024. <https://doi.org/10.1109/eeae60309.2024.10600559>
5. Tsantili A., Koronaki I. P., Polydoros V. Maximizing Energy Performance of University Campus Buildings through BIM Software and Multicriteria Optimization Methods. *Energies*, 16(5), 2023. 2291 pp. <https://doi.org/10.3390/en16052291>
6. Wang Z., Hu G. and Spanos C. J. Distributed model predictive control of bilinear HVAC systems using a convexification method. *Proc. of ASCC, Gold Coast, QLD, 2017*. 1608–1613 pp.

Kotsenko O.A. INFORMATION TECHNOLOGIES IN HEAT CONSUMPTION MANAGEMENT OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS

The article presents a comprehensive study of the role of information technologies in improving the efficiency of heat consumption management in educational institutions. The relevance of the topic is due to global energy challenges, high energy tariffs, increased requirements for energy efficiency of buildings, as well as the need to adapt educational infrastructure to the conditions of energy instability in Ukraine. A significant part of educational institutions operates in buildings with outdated heating systems and insufficient thermal insulation, which causes excessive consumption of thermal energy, overspending of budget funds and deterioration of microclimatic conditions. In such conditions, information technologies act as a powerful

tool for ensuring the rational use of resources, improving the manageability of heat supply and improving the quality of the educational environment.

The article considers the main types of IT solutions used to collect, process, analyze and visualize heat consumption data: sensor monitoring systems, programmable controllers, cloud platforms, SCADA systems, machine learning tools, automated control devices, digital information panels. Special attention is paid to the functioning of predictive models that allow adapting the heating system to dynamic conditions – outdoor temperature, class schedule, presence of people in the premises. It is shown that the integration of IoT solutions, analytical software and automation allows you to move from reactive to proactive heat consumption management based on data and forecasts. As a result of the analysis of modern scientific sources and practical experience in the use of IT in energy management, the advantages of the following approaches were identified: achieving energy savings of up to 30%, stabilizing the temperature regime in buildings, reducing the number of technical failures and improving service. The challenges that hinder the widespread implementation of digital solutions in Ukraine are revealed: limited financial resources, lack of trained personnel, fragmentation of initiatives, lack of unified standards and regulatory framework. The concept of digital transformation of heat consumption in education is proposed, which involves the gradual introduction of intelligent technologies, support from the state and development of competencies of energy managers.

The results of the study have practical significance for institutions of general secondary, vocational and higher education, local governments and specialists in the field of energy efficiency. They can be used to create digital monitoring platforms, develop regional programs for optimizing energy consumption, as well as as a basis for further scientific research.

Key words: *information technology, heat consumption, energy management, educational institutions, monitoring, energy efficiency, automation, data analytics, intelligent systems.*

Дата надходження статті: 27.07.2025

Дата прийняття статті: 01.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Пешко В.А.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Коновалюк О.Л.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ПУСКУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН РОТОРА ТУРБІНИ К-200-130

В роботі розглянуто нестационарний напружено-деформований стан ротора середнього тиску турбіни К-200-130 при пуску з холодного стану за двома різними графіками пуску, які використовуються на енергоблоках України. Графіки відрізняються тривалістю окремих пускових етапів, а також параметрами пари що подається в проточну частину та до кінцевих ущільнень циліндра. Розроблено тривимірну геометричну модель ротора, яка враховує його основні конструктивні особливості. Дослідження напружено-деформованого стану виконано з використанням методу скінченних елементів. Враховано отримані авторами раніше результати розрахунку нестационарних полів температур при пуску за розглянутими графіками. Додатково враховані змінні в часі відцентрові сили та тиск парового середовища, а також реакції опор валу. Встановлено, що найбільш навантаженою областю ротора турбіни К-200-130 є галтель 13-го ступеня з боку 14-го, а також термокомпенсаційні канавки передніх кінцевих ущільнень. Визначено, що найбільш напруженим для ротора часом пуску є момент синхронізації турбогенератора з енергосистемою. Час появи максимальних напружень збігається з моментом збільшення градієнтів температур в роторі. Показано провідну роль нерівномірності температурного поля у формуванні напружено-деформованого стану ротора. Зі стабілізацією теплового поля та завершенням пуску інтенсивність напружень зменшується. Різниця максимальних напружень для двох розглянутих пускових графіків є відносно невеликою та складає 2–8 %. При цьому час існування небезпечного рівня напружень в роторі відрізняється вдвічі, що матиме суттєвий вплив на швидкість накопичення розсіяного втомного пошкодження в основному металі. Пускова технологія, що передбачає більш тривалий етап попереднього прогріву проточної частини для нормалізації її теплового стану, призводить до меншого рівня напружень протягом циклу пуску. Доцільною є розробка спеціальних графіків пуску, що забезпечують рівномірність теплового поля деталей турбін за рахунок раціональної тривалості пускових етапів та параметрів робочого середовища.

Ключові слова: парова турбіна, ротор, графік пуску, напружено-деформований стан, нестационарність, інтенсивність напружень, концентратор, метод скінченних елементів.

Постановка проблеми. Робота турбін теплових електростанцій в енергосистемі супроводжується великою кількістю змінних режимів експлуатації. Під час пуску високотемпературні елементи турбін зазнають впливу особливо значних навантажень, які є змінними у часі [1, с. 5]. Така експлуатація призводить до поступового накопичення розсіяного втомного пошкодження та вичерпання індивідуального ресурсу [2, с. 2].

Ступінь накопичення пошкодження протягом пуску значною мірою визначається технологічними параметрами експлуатації, особливостями

навантаження, тривалістю та кількістю циклів пуску [3, с. 6]. Актуальним питанням є встановлення закономірностей формування напружено-деформованого стану найбільш відповідальних елементів турбіни під час пуску. Це дозволить розробити рекомендації щодо раціоналізації режимів експлуатації парових турбін для зменшення негативного впливу змінних режимів роботи на довговічність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поширеним підходом для дослідження напружено-деформованого стану геометрично-склад-

них об'єктів є метод скінченних елементів (FEM). Зокрема в роботі [4, с. 3] розроблено модель ротора високого тиску теплової електростанції (ТЕС) для продовження терміну його експлуатації. Запропоновано метод прогнозування ресурсу ротора, що передбачає кілька паралельних стаціонарних розрахунків його термонапруженого стану та обмін параметрами для багатозадачного навчання прогноуючої нейромережі.

Роботу турбін в змінних режимах експлуатації та під час пусків більш доцільно розглядати в нестационарній постановці. Провідну роль при моделюванні таких режимів відіграють графіки пуску [5, с. 4], що демонструють зміну ключових технологічних параметрів у часі. В роботі [5, с. 6] отримано графіки зміни еквівалентних пружних напружень протягом пуску для комбінованого ротора високого тиску турбіни потужністю 350 МВт.

В залежності від тривалості простою енергоблоку розрізняють пуски з холодного, неостиглого та гарячого стану металу. Визначальною є температура металу регулюючого ступеня турбіни, паровпуску або регулюючих клапанів та паропроводів [6, с. 41]. В літературі зазначається, що найбільш складним та ресурсо-визначаючим режимом експлуатації є пуск з холодного стану металу [7, с. 12]. Зокрема для ротора високого тиску турбіни Т-250/300-240 значні напруження в усіх досліджуваних областях виникають саме під час пуску з холодного стану. Найбільш напруженою зоною даного ротора є проміжні ущільнення між потоками циліндра в яких з'являється амплітуда еквівалентних напружень 285 МПа. Автори зазначають, що такий рівень напружень є небезпечним з точки зору малоциклової втоми металу.

Під час моделювання напружено-деформованого стану роторів турбін окремої уваги заслуговують зони концентрації напружень. Переважно, до них відносяться області різкої зміни геометрії, концентрації великої маси або впливу високої температури. Для роторів це зони кінцевих та діафрагмових ущільнень, осьові та розвантажувальні отвори, галтельні заокруглення дисків ступенів [8, с. 843]. Саме в цих зонах часто діагностуються тріщини втоми.

Одним із провідних механізмів формування високого рівня напружень є нерівномірність температурного поля ротора. Поява значних градієнтів температур часто супроводжується збільшенням інтенсивності напружень у відповідних областях [9, с. 7]. Разом з тим високий рівень

температур деталей турбін провокує значні температурні розширення металу та призводить до певної зміни його фізико-механічних властивостей [10, с. 2].

Врахування вище вказаних факторів дозволяє більш повно змодельовати навантаження основного металу під час пускових режимів експлуатації та виявити фактори, які призводять до погіршення напружено-деформованого стану деталей турбін. Раціоналізація пускових режимів експлуатації дозволить суттєво зменшити темп накопичення пошкодження та збільшити індивідуальний ресурс турбін [11, с. 95].

Постановка завдання. Метою статті є встановлення закономірностей формування нестационарного напружено-деформованого стану ротора середнього тиску (РСТ) турбіни К-200-130 під час пускових режимів експлуатації. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- створення геометричної моделі ротора середнього тиску турбіни К-200-130 з врахуванням конструктивних особливостей;
- розрахункове дослідження напружено-деформованого стану ротора під час пуску турбіни з холодного стану за різними технологіями (графіками пуску);
- порівняльний аналіз динаміки зміни інтенсивності напружень під час пуску за різними графіками.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження обрано ротор середнього тиску турбіни К-200-130, що пов'язано з кількома обставинами: поширеністю турбін потужністю 200 МВт в енергосистемі України, а також значним рівнем навантажень, якого зазнає саме ротор середнього тиску під час експлуатації. РСТ турбіни К-200-130 є достатньо габаритним та працює в умовах високих температур T_{III} , зазнаючи впливу пари після проміжного перегріву.

Тривимірна модель ротора середнього тиску представлена на рис. 1. Під час розробки даної моделі відтворено проєктну конструкцію згідно креслень заводу-виготовлювача та детальну увагу приділено зонам концентрації напружень, в яких під час експлуатації часто діагностуються тріщини втоми. При цьому прийнято рішення ступені № 17-23 не моделювати, оскільки вони працюють при більш помірних температурах.

Напружено-деформований стан роторів парових турбін значною мірою визначається їх тепловим станом та нерівномірністю температурних полів. В попередній публікації авторів визначено та проаналізовано нестационарний розподіл темпе-

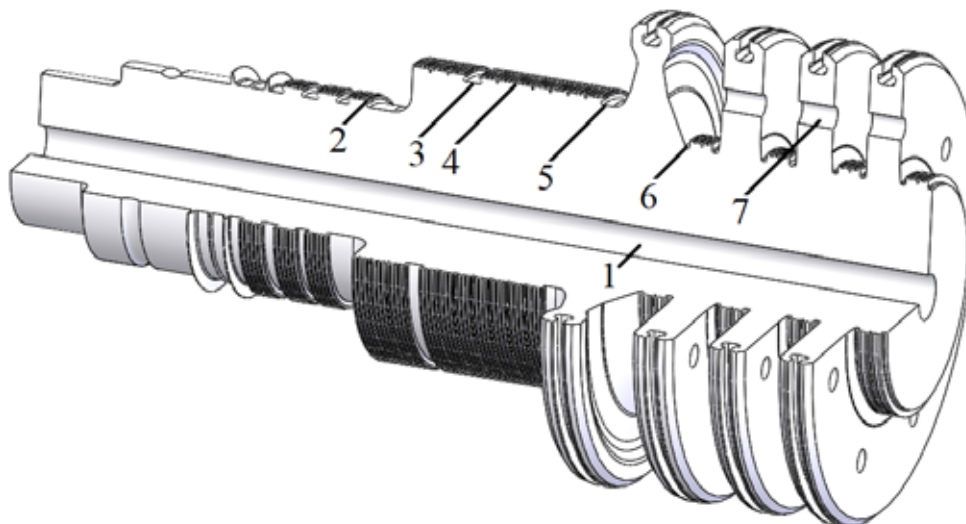


Рис. 1. Геометрична модель ротора середнього тиску турбіни К-200-130 (цифрами вказано характерні області дослідження інтенсивності напружень)

ратур в роторі середнього тиску турбіни К-200-130 при експлуатації за двома технологіями пуску з холодного стану [12, с. 257]. Встановлено, що найбільші градієнти температур (нерівномірність температурного поля) спостерігаються в момент поштовху роторів, синхронізації турбогенератора з енергосистемою та початковим навантаженням до 30 МВт. При цьому областями появи високих градієнтів температур є термокомпенсаційні канавки кінцевих ущільнень та галтельні заокруглення ступенів. Отримані результати використані як граничні умови при дослідженні напружено-деформованого стану ротора.

Разом з тим значний вплив на напружено-деформований стан ротора турбіни мають механічні навантаження, зокрема відцентрові сили. На рис. 2 показано графік зміни частоти обертання валопроводів та навантаження електрогенератора енергоблоків 1 і 2, що працюють за різними технологіями пуску з холодного стану. Поштовх валопроводу та вихід на холостий хід на енергоблоці 2 здійснюється швидше ніж на 1. Так само, навантаження генератора на блоці 2 відбувається швидше. Детальний аналіз розглянутих пускових графіків представлений в попередній статті авторів [12, с. 256].

Система диференціальних рівнянь рівноваги для осесиметричного ротора має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + \rho X_r = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} + \rho X_z = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де r, z, θ – циліндричні координати, σ – напруження, ρ – густина сталі; X_r, X_z – компоненти вектора густини масової сили.

Додатково враховуються співвідношення Гука записані через деформації:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{rr} + \epsilon_{zz} + \epsilon_{\theta\theta}) + \epsilon_{rr} \right); \\ \sigma_{zz} = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{rr} + \epsilon_{zz} + \epsilon_{\theta\theta}) + \epsilon_{zz} \right); \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{rr} + \epsilon_{zz} + \epsilon_{\theta\theta}) + \epsilon_{\theta\theta} \right); \\ \sigma_{rz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \epsilon_{rz}. \end{cases} \quad (2)$$

де E – модуль пружності сталі, ν – коефіцієнт Пуассона, ϵ – деформації.

В результаті було отримано нестационарний розподіл напружень в роторі середнього тиску при пуску з холодного стану для обох енергоблоків. Зокрема, на рис. 3 представлено напружений стан ротора енергоблоку № 2 в момент часу 4400 с, що відповідає етапу роботи на частоті 500 об/хв. Дана швидкість обертання має незначний вплив на інтенсивність напружень у роторі. Напружений стан переважно формується під впливом температур та їх нерівномірності, при чому саме в даний момент часу спостерігався один із локальних максимумів градієнтів температур [12, с. 258]. Найбільші значення напружень спостерігаються на периферійній частині дисків та в сегментах ущільнень. Максимум інтенсивності напружень складає 215 МПа та наявний

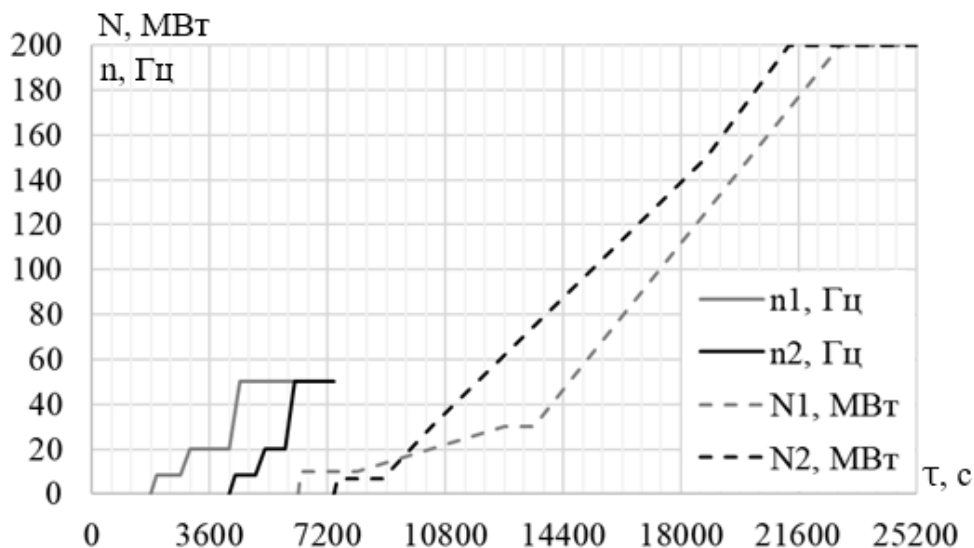


Рис. 2. Графіки поштовху роторів та навантаження турбогенератора блоків 1 та 2

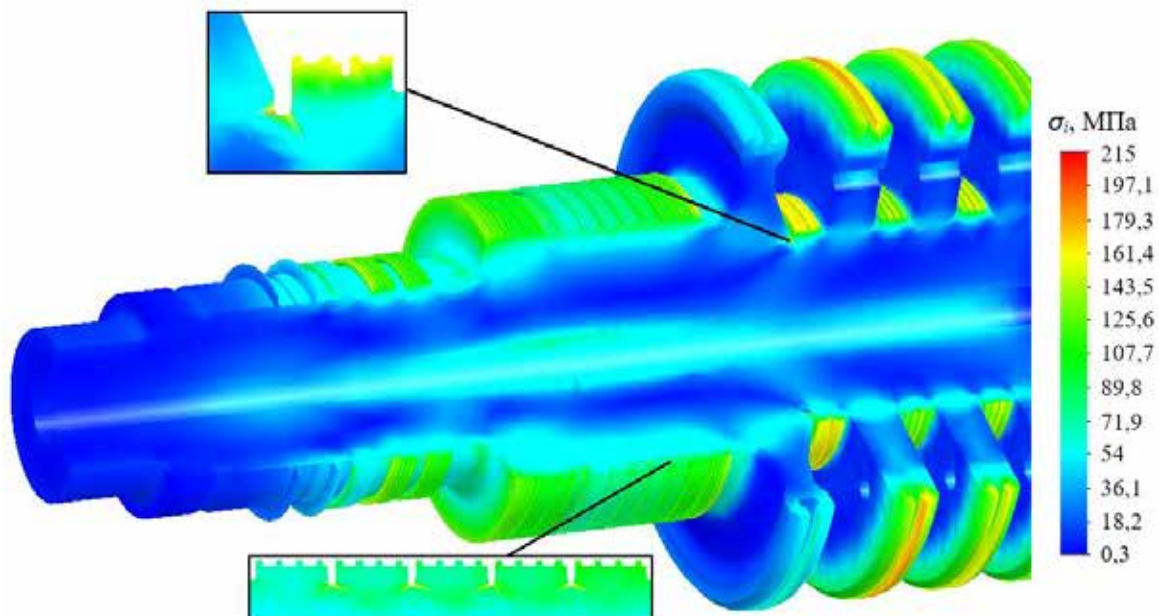


Рис. 3. Напружено-деформований стан ротора турбіни К-200-130 блоку № 2 в момент часу 4400 с (поштовх ротора до частоти 500 об/хв)

в області галтелі 13-го ступеня зі сторони наступних ступенів.

В подальшому зі збільшенням частоти обертання рівень напружень в більшості областей зростає. Зокрема, на рис. 4 показано напружений стан ротора в момент часу 6300 с перед синхронізацією з енергосистемою при пуску за 2-гою технологічною схемою. З епюри чітко помітна концентрація напружень в області галтелі 13-го ступеня (454 МПа) та термокомпенсаційних канавок перших сегментів кінцевих ущільнень (378–442 МПа). Разом з тим, значні розтягуючі напруження вини-

кають в області технологічного каналу (осьового отвору) ротора на рівні 290–342 МПа, що пов'язано зі збільшенням частоти обертання до 3000 об/хв та значною масою дисків ступенів.

В даний момент часу (6300 с) спостерігається абсолютний максимум напружень в роторі, який співпадає з максимумом градієнтів температур, що отриманий авторами раніше [12, с. 258]. Таким чином, можна стверджувати, що при пуску турбіни з холодного стану провідну роль на формування напружено-деформованого стану її ротора має нерівномірність температурного поля.

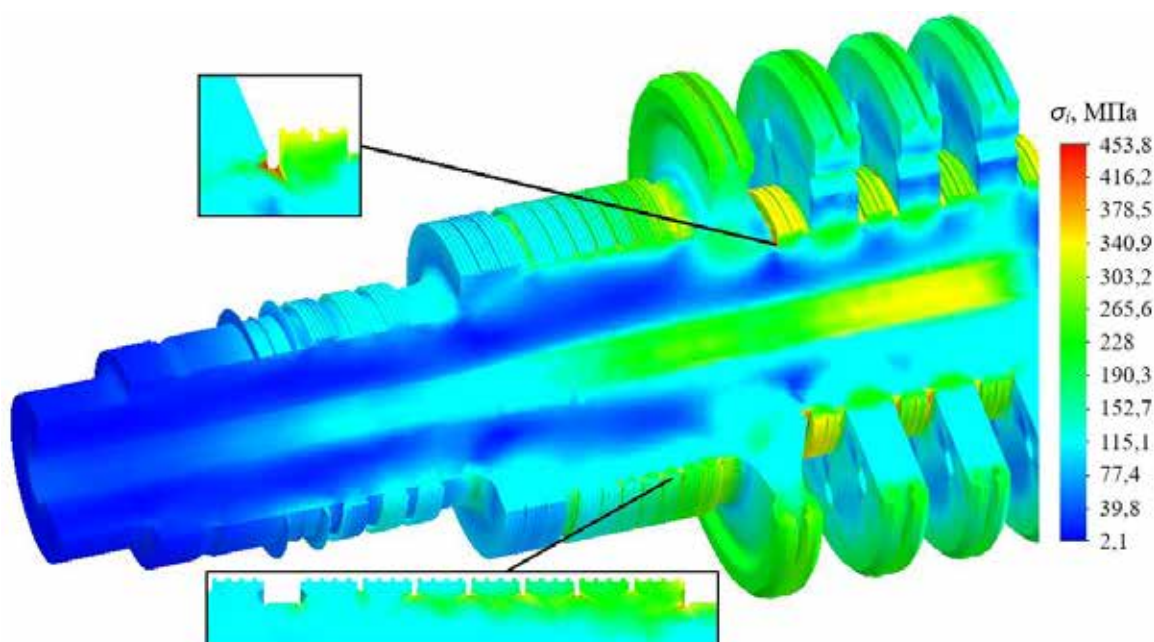


Рис. 4. Напружено-деформований стан ротора турбіни К-200-130 блоку № 2 в момент часу 6300 с (синхронізація генератора з енергосистемою)

Аналогічні дані отримані для кожного моменту часу при пуску з холодного стану, а також для енергоблоку, що працює за 1-ою пусковою схемою. Для зручності, ці дані представлені на рис. 5 у вигляді графіків зміни інтенсивності напружень в характерних областях дослідження (номери точок показані на рис. 1). Додатково, для встановлення характеру напружень (розтягуючі, стискаючі) були проаналізовані епюри компонентів головних напружень σ_1 , σ_2 , σ_3 :

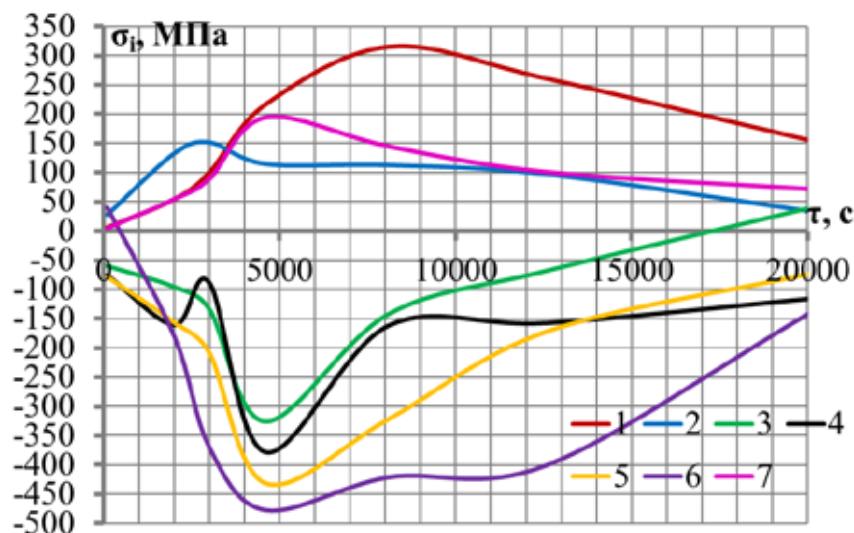
$$\sigma_i = \text{sign}[\max(|\sigma_1|; |\sigma_2|; |\sigma_3|)] \cdot \sigma_i \quad (3)$$

Найбільш навантаженою зоною ротора середнього тиску протягом всього пуску для обох енергоблоків є галтель регулюючого ступеня зі сторони наступних ступенів (т. 6 на рис. 1). Максимум інтенсивності напружень в даній області складає 477 МПа для блоку 1 та 454 МПа – для блоку 2. Також значних стискаючих навантажень при пуску зазнають області 3, 4 і 5, що відповідають сегментам кінцевих ущільнень. Найбільших розтягуючих напружень зазнає область осевого отвору ротора (т. 1 на рис. 1) які складають 312–316 МПа для обох енергоблоків. Подібність цих значень пов'язана з тим, що метал технологічного каналу не контактує з парою в обох випадках, а прогрівається лише за рахунок теплопровідності від зовнішніх шарів сталі, тому нерівномірність зовнішнього температурного поля має менший вплив на внутрішні поверхні.

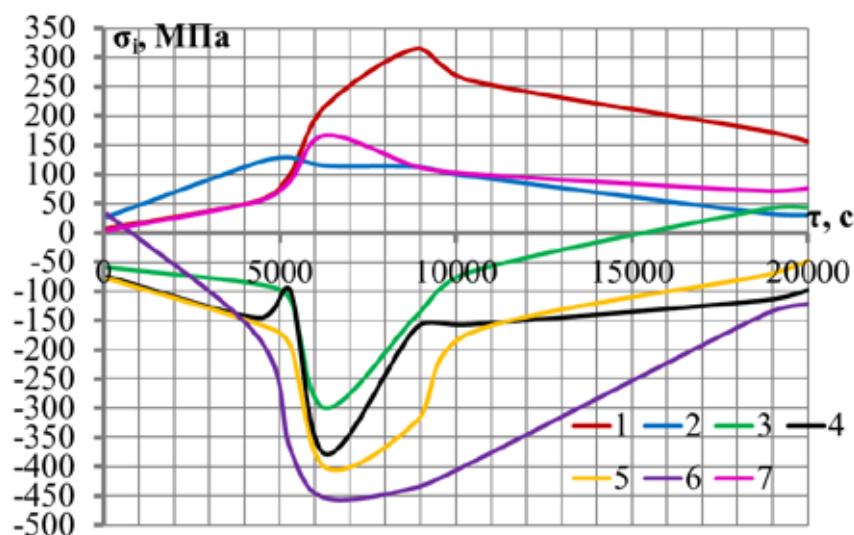
Моменти появи максимальних напружень співпадають з відповідними моментами діагностування максимуму градієнтів температур в роботі [12, с. 258]. В подальшому, зі стабілізацією температурного поля зменшується і рівень напружень в досліджуваних областях.

Отримані результати (рис. 5) показують важливість етапу попереднього прогріву проточної частини турбіни та плавної зміни температури робочої пари що реалізовані на блоці № 2. Хоч різниця між максимальними значеннями напружень для розглянутих точок складає 2–8 %, помітним є відмінний термін наявності небезпечного рівня напружень. Наприклад для зони галтелі регулюючого ступеня (т. 6 на рис. 5) інтенсивність напружень вище 400 МПа для блоку 1 наявна протягом 2,72 год (9800 с), а для блоку 2 вдвічі менший проміжок часу – 1,32 год (4750 с). Безперечно ця обставина матиме суттєвий вплив на темпи накопичення пошкодження в основному металі ротора середнього тиску турбіни К-200-130.

В подальшому авторами передбачено оцінити довговічність експлуатації ротора середнього тиску турбіни К-200-130 що працює за двома розглянутими технологіями пуску. Перспективним є розроблення рекомендацій щодо зміни тривалості окремих пускових етапів та технологічних параметрів робочого середовища з метою зменшення негативного впливу змінних режи-



а



б

Рис. 5. Динаміка зміни інтенсивності напружень в характерних областях ротора при пуску з холодного стану: а – блок 1, б – блок 2

мів роботи на індивідуальний ресурс турбінного устаткування.

Висновки. Оцінено вплив характеру пускового графіку енергоблока 200 МВт на напружено-деформований стан ротора середнього тиску турбіни як найбільш ресурсо-визначаючого елемента. Дані дослідження ґрунтуються на проведенню раніше розрахунку теплового стану РСТ під час пускового режиму роботи [12, с. 254]. Розглянуто два графіки пуску з холодного стану що використовуються на енергоблоках ТЕС України та відрізняються тривалістю окремих пускових етапів та параметрами робочого середовища.

Отримано нестационарний розподіл інтенсивності напружень в роторі середнього тиску

в кожен момент часу пуску. Встановлено найбільш навантажені області ротора, а саме: галтелі ступенів, термокомпенсаційні канавки кінцевих ущільнень та технологічний канал ротора. Встановлено, що небезпечний рівень інтенсивності напружень більше 400 МПа спостерігається в галтелі регулюючого ступеня протягом 2,72 год при роботі за першим пусковим графіком та 1,32 год при роботі за другим.

Динаміка зміни інтенсивності напружень в досліджуваних областях є достатньо подібною до аналогічної зміни градієнтів температур, що свідчить про домінуючий вплив термічних напружень та нерівномірності теплового поля на напружено-деформований стан ротора. Доцільним

є вдосконалення пускових графіків за рахунок зміни тривалості окремих пускових етапів та технологічних параметрів робочого середовища. Це

дозволить зменшити негативний вплив пускових режимів роботи на індивідуальний ресурс турбінного устаткування.

Список літератури:

1. Zhu G., Guo D., Li J., Xie Y., Zhang D. Intelligent steam turbine start-up control based on deep reinforcement learning. *Energy*. 2025. Vol. 320. 135335. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135335.
2. Gao J., Tang Z., Guo B., Xu Z., Liu M., Sun W., Zhao Z. Study of cracks in the last-stage rotor blade of a steam turbine and the corrosion fatigue properties of its materials. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Issue 17. e36633. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e36633.
3. Zhang G., Wang X., Jin Z., Dykas S., Smółka K. Numerical study of the loss and power prediction based on a modified non-equilibrium condensation model in a 200 MW industrial-scale steam turbine under different operation conditions. *Energy*. 2023. Vol. 275. 127530. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127530.
4. Chen S., Zhang J., Chen M., Pan L. Parallel prediction method for damage factors and life loss of turbine high-pressure rotors based on soft parameter sharing mechanism of multi-task learning. *Energy*. 2025. Vol. 326. 136196. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136196.
5. 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. № 127. 105435. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105435.
6. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V. Research on residual service life of automatic locking valve of turbine K-200-130. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5. No 8(89). P. 39-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.112284.
7. Шульженко М., Гонтаровський П., Матюхін Ю., Гармаш Н., Гонтаровський В. Система діагностики термонапруженого стану і спрацювання ресурсу ротора високого тиску турбіни Т-250/300-240 на стаціонарних та змінних режимах роботи. *Проблеми машинобудування*. 2013. Т. 16. № 6. С. 8-14.
8. Spahic M., Guarino D., Brichtart C., Billet D., Petit F. Mitigating the risk for creep-fatigue cracking in steam turbine rotors: an end user's perspective. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 57. P. 833-847. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.03.090.
9. Gharehbaghi H., Aghaei M. Investigation of creep-fatigue interaction in steam turbine rotor. *Forces in Mechanics*. 2025. Vol. 19. 100314. DOI: 10.1016/j.finmec.2025.100314.
10. Balitskii A., Havrilyuk M., Balitska V., Kolesnikov V., Ivaskevych L. Increasing Turbine Hall Safety by Using Fire-Resistant, Hydrogen-Containing Lubricant Cooling Liquid for Rotor Steel Mechanical Treatment. *Energies*. 2023. № 16. 535. DOI: 10.3390/en16010535.
11. Chernousenko O., Peshko V., Rindyuk D. The System for Planning Cost-efficient and Resource-saving Operating Modes of TPP. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. P. 88-97. DOI: 10.1007/978-3-031-18487-1_9.
12. Пешко В., Коновалюк О. Закономірності формування температурного поля ротора турбіни під час пускового режиму роботи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35(74). № 4. С. 254-259. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.4/37.

Peshko V.A., Konovaliuk O.L. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF START-UP TECHNOLOGY ON THE STRAIN-STRESS STATE OF THE K-200-130 TURBINE ROTOR

The work observes the non-stationary stress-strain state of the intermediate-pressure rotor of the K-200-130 turbine during start-up from a cold state according to two schedules used at power units in Ukraine. The graphs differ in the duration of individual start-up stages, as well as the parameters of the steam supplied to the flow section and to the end seals of the cylinder. A three-dimensional geometric model of the rotor has been developed, which takes into account its main design features. The study of the strain-stress state was performed using the finite element method. The authors previously obtained results of calculating non-stationary temperature fields during start-up according to the considered graphs were taken into account. Additionally, the time-varying centrifugal forces and pressure of the steam, as well as the reaction of the support shaft, were taken into account. It was established that the most loaded area of the K-200-130 turbine rotor is the fillet of the 13th stage from the side of the 14th, as well as the thermal compensation grooves of the front end seals. It has been determined that the most stressful start-up time for the rotor is the moment of synchronization of the turbogenerator with the power system. The time of appearance of maximum stresses coincides with the moment of increase in temperature gradients in the rotor. The leading role of the unevenness of the temperature field on the stressed state of the rotor is shown. With the stabilization of the thermal field and the completion of the start-up, the intensity of the stresses decreases. The difference in maximum stresses

for the two considered starting graphs is relatively small and amounts to 2-8%. However, the time of existence of a dangerous level of stresses in the rotor differs by half, which will have a significant impact on the rate of accumulation of diffuse fatigue damage in the base metal. The starting technology, which involves a longer stage of preheating the flow part to normalize its thermal state, leads to a lower level of stresses during the starting cycle. It is advisable to develop special starting graphs that ensure uniformity of the thermal field of turbine parts due to the rational duration of the starting stages and steam parameters.

Key words: steam turbine, rotor; start-up schedule, stress-strain state, non-stationarity, stress intensity, concentrator, finite element method.

Дата надходження статті: 11.07.2025

Дата прийняття статті: 17.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Політикін М.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У СИСТЕМІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОКВАРТИРНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

Попри значний потенціал розвитку відновлюваної енергетики, енергетична система України все ще значною мірою залежить від викопного палива, зокрема природного газу, що ускладнює масштабне впровадження сталих джерел енергії в житловому секторі. Особливо актуальним це питання є для населених пунктів, де централізоване теплопостачання або недоступне, або нестабільне, а енергоносії мають високу вартість. У цьому контексті перспективним рішенням є поєднання теплового насоса з сонячною електростанцією як комплексної системи енергозабезпечення, здатної забезпечити опалення та гаряче водопостачання житлових будинків упродовж опалювального періоду. Така система дозволяє скоротити споживання енергії з мережі, підвищити енергоефективність будівлі та сприяти декарбонізації побутового сектору.

У статті представлено математичну модель функціонування інтегрованої системи енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку, яка поєднує тепловий насос та сонячну електростанцію. Актуальність дослідження зумовлена потребою в підвищенні енергоефективності житлового сектору в умовах децентралізації енергетичних систем та зростаючої вартості традиційних енергоносіїв. Метою роботи є дослідження ефективності різних алгоритмів взаємодії між джерелами генерації теплової та електричної енергії з урахуванням добових коливань температури та інсоляції.

У межах дослідження розраховано погодинні значення потужності сонячної генерації, теплових втрат будівлі, потреб у гарячому водопостачанні та електроспоживання теплового насоса. Проведено моделювання функціонування системи за чотирма сценаріями: базовим, реакційним, економним та автономним. Особливу увагу приділено аналізу економного режиму роботи, при якому тепловий насос активується лише за наявності достатнього рівня сонячної генерації.

Результати моделювання показали, що за сприятливих кліматичних умов система може працювати автономно до 10 годин на добу, забезпечуючи потреби в опаленні та гарячій воді без підключення до електромережі. Обсяг електроенергії, спожитої з мережі, істотно знижується, що дозволяє зменшити витрати на енергозабезпечення будинку. Одержані висновки можуть бути використані для попередньої енергетичної оцінки житлових об'єктів, а також при проектуванні систем з відновлюваними джерелами енергії.

Ключові слова: тепловий насос, сонячна електростанція, гібридна енергосистема, енергоефективність, моделювання, опалення, відновлювані джерела енергії, оптимізація енергоспоживання.

Постановка проблеми. У сучасних умовах підвищення цін на енергоносії, енергетичної нестабільності та необхідності зниження викидів парникових газів, актуальним є впровадження відновлюваних джерел енергії у системи теплопостачання житлових будинків [1]. Одним із перспективних рішень є поєднання роботи теплового насоса з фотоелектричною електростанцією, що дозволяє використовувати електроенергію, виро-

блену на місці, для покриття теплових потреб. Проте ефективність такої системи значною мірою залежить від погодних умов, режиму роботи обладнання, а також профілю споживання теплової енергії мешканцями [2, 3].

Недостатня узгодженість роботи теплового насоса з добовими та сезонними коливаннями сонячної генерації може призводити до підвищеного навантаження на електромережу або до

нерационального використання відновлюваної енергії [4]. Це зумовлює необхідність математичного моделювання роботи системи з урахуванням реальних умов експлуатації, що дозволяє оцінити ефективність різних алгоритмів управління та оптимізувати взаємодію елементів. Наразі частка відновлюваних джерел енергії в загальному світовому споживанні становить лише 9% [1]. У країнах з великими запасами викопного палива заміщення традиційних джерел енергії відновлюваними все ще відбувається дуже повільно, проте поступово [5]. Сонячна, вітрова та геотермальна енергія – це три відновлювані джерела енергії, в яких Україна має найбільший потенціал. У ситуації, коли розглядається опалення будівель у найвіддаленіших районах південного сходу країни, де немає газопроводів, оскільки споживачі змушені використовувати нафтопродукти або газові балони, гібридна система, яка поєднує сонячний колектор та геотермальний тепловий насос (ГТН), що є чистим джерелом енергії, є дуже рекомендованим рішенням. Ця система може використовуватися не лише для опалення, але й для гарячого водопостачання (ГВП) у домогосподарствах. Моделювання роботи комбінованої системи типу ГТНП (сонячний тепловий насос на основі ґрунту) у регіоні з високим потенціалом як сонячної, так і геотермальної енергії, є значним кроком уперед у впровадженні відновлюваної енергетики в країні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В огляді літератури з досліджень провідних вчених [3] представлено чудові комбінації сонячних колекторів з тепловими насосами, серед яких є ґрунтові та повітряні джерела. У контексті переходу до відновлюваних джерел енергії та декарбонізації будівельного сектору значну увагу дослідники приділяють комбінованим системам на основі теплових насосів і сонячної генерації. Сян Б. та співавт. провели 10-річне моделювання фотоелектрично-термічної дороги, що асистує ґрунтовому тепловому насосу для опалення будівлі у сервісній зоні автомагістралі [1]. Результати вказують на можливість забезпечення стабільного теплопостачання навіть у періоди пікових навантажень. Маєр Л. та колеги досліджували моделі теплових насосів на основі змішаних цілочисельних підходів для систем предикативного управління в будівлях [2]. Їхній підхід дозволяє оптимізувати роботу системи в умовах мінливих енергетичних потреб. Бірн П. у своєму огляді [3] систематизував сучасні підходи до моделювання теплових насосів, здатних забезпечувати одночасне опалення й охолодження, що є актуальним

для багатофункціональних житлових і комерційних будівель. Есламі С. та співавт. застосували методи геоінформаційного моделювання (GIS) і машинного навчання для планування централізованого теплопостачання із залученням сонячної енергії та теплового насоса на прикладі міста Газіантеп (Туреччина) [4]. Дюмуєн Р., Руніс Е. Д. і Атієнітіс А. моделювали взаємодію будинку з інтегрованою фотоелектрично-термічною системою та повітряним тепловим насосом, звертаючи увагу на інтеграцію з мережею та внутрішній комфорт [5]. Батталья В. з колегами представили динамічну модель геотермального теплового насоса в позитивно-енергетичному будинку, що дозволяє враховувати сезонну акумуляцію та теплову інерцію системи [6]. Чжан С. та співавт. експериментально досліджували поєднану роботу сонячної системи та ґрунтового теплового насоса в односімейному будинку, здійснивши оцінку енергетичних потоків і ККД [7]. Гальяно А., Тіна Д. М. та Анелі С. у своєму дослідженні [8] показали шляхи підвищення енергетичної самодостатності житлових будинків завдяки поєднанню сонячних теплових систем, теплових насосів та систем накопичення енергії. Чжен Ч. зі співавторами проаналізували інтегровану роботу ґрунтового та повітряного теплових насосів з підтримкою від сонячних панелей, провівши техніко-економічну оптимізацію гібридної системи [9]. Хай Т. та колектив авторів провели симуляцію перехідних процесів у системі енергопостачання «розумного» будинку, що працює на сонячній енергії та реверсивному тепловому насосі, з оцінкою економічної ефективності [10]. На думку авторів, типовий термін окупності таких систем становить 3–5 років. Поточну ситуацію з дефіцитом енергії, яку необхідно вирішити, та заклик до зменшення викидів вуглецю в міському житловому секторі також слід зазначити для України. Наприклад, в умовах значно підвищеної потреби в енергонезалежності багатоквартирних будинків, особливо у випадку нестабільного електропостачання, інтеграція теплових насосів із сонячною електростанцією є найкращим та найчистішим рішенням [1]. Оскільки графіки споживання нерівномірні, необхідне балансування навантаження, а також оптимальний розподіл енергії між споживачами, тому багатоквартирні будинки, на відміну від індивідуального сектору, створюють додаткову складність. З огляду на це, постає проблема створення адаптивної моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у багатоквартирному житловому будинку, яка враховує динаміку споживання, кліматичні

умови та технічні параметри обладнання з метою підвищення енергоефективності та енергетичної незалежності системи. актуальною є задача моделювання взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у складі локальної системи енергозабезпечення багатоквартирного будинку [3]. Такий метод дозволяє оцінити енергоефективність, здатність адаптуватися до сезонних кліматичних змін та можливість зменшення споживання енергії з мережі [4].

Постановка завдання. Метою роботи є розробка та аналіз математичної моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції в системі енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку з урахуванням погодинної динаміки навантаження та генерації.

Методика дослідження. У межах даного дослідження було розроблено математичну модель функціонування системи енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку, що поєднує в собі сонячну електростанцію (СЕС) та тепловий насос (ТН). Метою моделювання є аналіз ефективності різних алгоритмів взаємодії елементів системи в умовах змінних кліматичних параметрів, добового споживання теплової енергії та електропостачання [2, 3].

Вибір параметрів моделювання сумісної роботи сонячної електростанції та теплового насоса: Температура зовнішнього повітря та рівень сонячної інсоляції задавалися погодинно для типового зимового дня. Внутрішня температура у приміщенні приймалася постійною: $T_{\text{вн}} = 21^{\circ}\text{C}$. Площа огорожувальних конструкцій та площа сонячних панелей були встановлені як $A_{\text{огр}} = 100\text{ м}^2$ та $A_{\text{pv}} = 20\text{ м}^2$ відповідно. Витрати гарячої води на одну квартиру приймалися з урахуванням нормативних значень та усередненої температури подачі (50°C). з урахуванням поділу на погодинне споживання.

Для обчислення необхідної електричної потужності теплового насоса було досліджено економічний режим – тепловий насос працює лише у години достатньої сонячної генерації [9].

Модель реалізована у середовищі Excel для візуалізації результатів. Вхідні дані задавалися у вигляді масивів погодинних значень, вихідні – у вигляді таблиць та графіків. Згідно математичної моделі визначали кількість годин, упродовж яких система могла працювати автономно. Проводився аналіз співвідношення між генерацією, тепловим навантаженням та електроспоживанням системи.

Алгоритм реалізації моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції в системі

теплопостачання багатоквартирного будинку включав наступні етапи (рис. 1).

Вище представлена схема (рис. 1) демонструє алгоритм моделювання функціонування системи теплопостачання з використанням теплового насоса, генерації електроенергії з допомогою фотоелектричних модулів та різних режимів (алгоритмів) роботи.

Виклад основного матеріалу. У результаті чисельного моделювання було отримано погодинні характеристики роботи інтегрованої системи теплопостачання, що поєднує сонячну електростанцію (СЕС) та тепловий насос (ТН), в умовах типового зимового дня. Аналіз проводився для економічного алгоритму керування, який передбачає активування теплового насоса виключно за наявності достатньої сонячної генерації [1].

Отримані дані охоплюють ключові показники системи: рівень інсоляції, зовнішню температуру, потужність генерації від СЕС, теплові потреби будівлі, необхідну електричну потужність для забезпечення опалення та гарячого водопостачання, а також споживання електроенергії з мережі.

На основі аналізу результатів встановлено, що упродовж близько 10 годин на добу система може працювати автономно, забезпечуючи всі теплові потреби винятково за рахунок сонячної енергії. В інші години, переважно вночі та вранці, частина електричної енергії покривалася за рахунок підключення до мережі. Така динаміка підтверджує ефективність обраного режиму керування в контексті мінімізації витрат на енергоспоживання та використання відновлюваних джерел енергії [1, 7].

Нижче наведена узагальнена математична модель, яка враховує основні блоки:

Потужність генерації електроенергії сонячною електростанцією:

$$P_{\text{pv}}(t) = I(t) \cdot A_{\text{pv}} \cdot \eta_{\text{pv}} \quad (1)$$

де: I – інсоляція [$\text{Вт}/\text{м}^2$]; t – час (в годинах, днях або місяцях); A_{pv} – площа фотомодулів [м^2]; η_{pv} – ефективність фотомодулів.

Потужність теплового насоса:

$$Q_{\text{тепл}}(t) = \text{COP}(T_{\text{вх}}(t)) \cdot P_{\text{ел.насос}}(t) \quad (2)$$

де: $T_{\text{вх}}$ – температура джерела (грунт, повітря і т.п.); $P_{\text{ел.насос}}(t)$ – електроспоживання теплового насоса; $\text{COP}(T_{\text{вх}})$ – коефіцієнт ефективності теплового насоса (залежить від температури).

Розрахунок потреб тепла здійснювали згідно формули (3) [7]:



Рис. 1. Алгоритм реалізації моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції в системі тепlopостачання багатоквартирного будинку

$$Q_{\text{бул}}(t) = Q_{\text{опал}}(t) + Q_{\text{ГВП}}(t) \quad (3)$$

де: $Q_{\text{ГВП}}$ – витрата гарячої води [л/добу];
 $Q_{\text{опал}}(t)$ – потреба на опалення:

$$Q_{\text{опал}}(t) = U \cdot A_{\text{огр}} \cdot (T_{\text{мереж}} - T_{\text{навок}}(t)) \quad (4)$$

$T_{\text{навок}}$ – температура навколишнього середовища [°K]

$T_{\text{мереж}}$ – температура мережевої води

$T_{\text{втор}}$ – температура теплоносія вторинного контуру

$$Q_{\text{ГВП}}(t) = c \cdot \rho \cdot Q_{\text{ГВП}} \cdot (T_{\text{ГВП}} - T_{\text{вх}}) \quad (5)$$

Режими роботи (алгоритми):

Базовий: тепловий насос працює стабільно для покриття всієї потреби.

Реакційний: насос вмикається/вимикається в залежності від дефіциту тепла [9].

Економний: використовує лише надлишкову PV-енергію.

Автономний: PV + акумулятор, незалежна система.

Енергоспоживання теплового насоса кожному режимі розраховується за формулою (6):

$$P_{\text{ел.викор}}(t) = \max(P_{\text{ел.насос}}(t) - P_{\text{PV}}(t), 0) \quad (6)$$

Вартість спожитої електроенергії:

$$C = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{ел.викор}}(t) \cdot c_{\text{ел}}(t) dt \quad (7)$$

де $c_{\text{ел}}(t)$ – тариф на електроенергію.

Нижче подано приклад реалізації математичної моделі для «економного алгоритму» функціонування системи тепlopостачання, де теплова енергія подається тільки в ті години, коли доступна достатня кількість електроенергії з фотоелектричних панелей.

Витрата ГВП: $\dot{V}_{\text{ГВП}} = 0,1$ м³/добу

$$T_{\text{внутр}} = 21^\circ \text{C}, T_{\text{вх}} = 10^\circ \text{C}, T_{\text{ГВП}} = 50^\circ \text{C} \quad (8)$$

Розрахунок по годинах дня: $t = 1, \dots, 24$

Енерготариф: $c_{\text{ел}} = 4,32$ грн/кВт·год

Алгоритм «економного режиму»

Використовуємо тільки сонячну енергію – насос працює за умови, коли $P_{\text{PV}}(t) \geq P_{\text{ел}}(t)$

Якщо не вистачає – тепlopостачання не відбувається

У цьому режимі:

$$P_{\text{мережа}}(t) = 0 \Rightarrow C = 0 \quad (9)$$

Нижче подано приклад реалізації математичної моделі для «економного алгоритму» функціонування системи опалення, де теплова енергія подається тільки в ті години, коли доступна достатня

кількість електроенергії з фотоелектричних панелей [10].

Вихідні умови для розрахунку математичної моделі були наступні:

Площа панелей: $A_{\text{PV}} = 20$ м²

Ефективність панелей: $\eta_{\text{PV}} = 0,18$

Питомі значення:

$c = 4,18 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°K)

$\rho = 1000$ кг/м³

$U = 0,5$ Вт/м²·K

$A_{\text{огр}} = 100$ м²

$COP = 3,0$ (припустимо сталою для спрощення)

Витрата ГВП: $\dot{V}_{\text{ГВП}} = 0,1$ м³/добу

$T_{\text{внутр}} = 21^\circ \text{C}$, $T_{\text{вх}} = 10^\circ \text{C}$, $T_{\text{ГВП}} = 50^\circ \text{C}$

Розрахунок по годинах дня: $t = 1, \dots, 24$

Енерготариф: $c_{\text{ел}} = 4,32$ грн/кВт·год

Алгоритм «економного режиму»

В розрахунку математичної моделі згідно економного режиму розглядали використання тільки сонячної енергії – насос працює ТІЛЬКИ коли $P_{\text{PV}}(t) \geq P_{\text{ел}}(t)$

Якщо не вистачає потужності – тепlopостачання не відбувається

1. Генерація сонячної електроенергії:

$$P_{\text{PV}}(t) = I(t) \cdot A_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad (10)$$

2. Потреба в теплі:

$$Q_{\text{опал}}(t) = U \cdot A_{\text{огр}} \cdot (T_{\text{внутр}} - T_{\text{навок}}(t)) \quad (11)$$

$$Q_{\text{ГВП}} = c \cdot \rho \cdot \dot{V}_{\text{ГВП}} \cdot (T_{\text{ГВП}} - T_{\text{вх}}) / 24 \quad (12)$$

3. Електроспоживання теплового насоса:

$$P_{\text{ел}}(t) = \frac{Q_{\text{опал}}(t) + Q_{\text{ГВП}}}{COP} \quad (13)$$

4. Умова запуску:

Якщо $P_{\text{PV}}(t) \geq P_{\text{ел}}(t) \Rightarrow$ виконується опалення, інакше ні.

5. Вартість електроенергії:

Гранична умова економного режиму:

$$P_{\text{мережа}}(t) = 0 \Rightarrow C = 0 \quad (14)$$

Умови тепlopостачання виконуються тільки тоді, коли генерація сонячної електроенергії $P_{\text{PV}} \geq$ потрібної потужності теплового насоса $P_{\text{ел}}$.

Години 6–23 (6:00–23:00) – тепlopостачання відбувається частково або повністю за рахунок сонячної енергії.

Вартість електроенергії з мережі значна тільки вночі та на світанку. В табл. 1. Подано результати обчислення згідно математичної моделі.

Табл. 1 охоплює добовий цикл із погодинним урахуванням температури зовнішнього повітря,

Погодинні результати моделювання взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у системі енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку в економному режимі

T, год	T _{зовн} , °C	I, Вт/м ²	P _{pv} , кВт	Q _{опал} , Вт	Q _{заг} , Вт	Q _{ГВП} , кВт	Нагрів	P, кВт
0	-5	0	0	1300	1493,51	0,49784	-	0,49
1	-6	0	0	1350	1543,51	0,51450	-	0,51
2	-7	0	0	1400	1593,51	0,53117	-	0,53
3	-8	0	0	1450	1643,51	0,54784	-	0,54
4	-7	10	0,036	1400	1593,51	0,53117	-	0,49
5	-5	50	0,18	1300	1493,51	0,49784	-	0,31
6	-3	150	0,54	1200	1393,51	0,46450	+	0
7	0	300	1,08	1050	1243,51	0,41450	+	0
8	2	500	1,8	950	1143,51	0,38117	+	0
9	4	600	2,16	850	1043,51	0,34784	+	0
10	5	700	2,52	800	993,518	0,33117	+	0
11	6	800	2,88	750	943,518	0,31450	+	0
12	5	750	2,7	800	993,518	0,33117	+	0
13	4	650	2,34	850	1043,51	0,34784	+	0
14	3	500	1,8	900	1093,51	0,36450	+	0
15	2	300	1,08	950	1143,51	0,38117	+	0
16	1	100	0,36	1000	1193,51	0,39784	-	0,037
17	0	50	0,18	1050	1243,51	0,41450	-	0,234
18	-1	10	0,036	1100	1293,51	0,43117	-	0,395
19	-2	0	0	1150	1343,51	0,44784	-	0,447
20	-3	0	0	1200	1393,51	0,46450	-	0,464
21	-4	0	0	1250	1443,51	0,48117	-	0,481
22	-5	0	0	1300	1493,51	0,49784	-	0,497
23	-6	0	0	1350	1543,51	0,51450	-	0,514

сонячного випромінювання та теплових потреб житлового будинку. Визначено, що:

У темний період доби (0:00–5:00, 16:00–23:00) тепловий насос не може працювати автономно через відсутність генерації сонячної електроенергії. Потреби в теплі покриваються частково або повністю за рахунок електроенергії з мережі (до 0,54 кВт у години з найнижчими температурами).

У денний період (6:00–15:00) генерація від фотоелектричних панелей поступово зростає й досягає максимуму близько 11–13 годин (2,88 кВт при інсоляції 800 Вт/м²). У цей період тепловий насос працює виключно за рахунок сонячної генерації, повністю покриваючи теплові потреби.

В середньому протягом 10 годин на добу система функціонує автономно, без використання електроенергії з мережі, що демонструє високий потенціал впровадження гібридної схеми у багатоквартирних житлових будинках [1].

Графічне зображення режимів роботи системи згідно математичної моделі представлено на рис. 2.

Розроблена модель підтверджує ефективність застосування економного алгоритму керування теплопостачанням, що дозволяє мінімізувати витрати на електроенергію за рахунок адаптивної роботи теплового насоса у синхронізації з генерацією сонячної електростанції.

Висновки. У результаті проведеного енергетичного моделювання взаємодії сонячної електростанції та теплового насоса в системі забезпечення потреб багатоквартирного житлового будинку сформульовано узагальнені положення щодо ефективності поєднання відновлюваних джерел енергії та інтелектуальних систем керування. Побудована математична модель дозволяє враховувати погодинні зміни зовнішніх кліматичних умов, добові коливання навантажень на системи опалення й гарячого водопостачання, а також динаміку електричної генерації фотоелектричної установки. Модель демонструє гнучкість щодо вибору сценаріїв керування (базовий, реакційний, економний, автономний), що дозволяє адаптувати систему до різних технічних, кліматичних та економічних умов.

Застосування економного алгоритму керування забезпечує автономну роботу системи упродовж

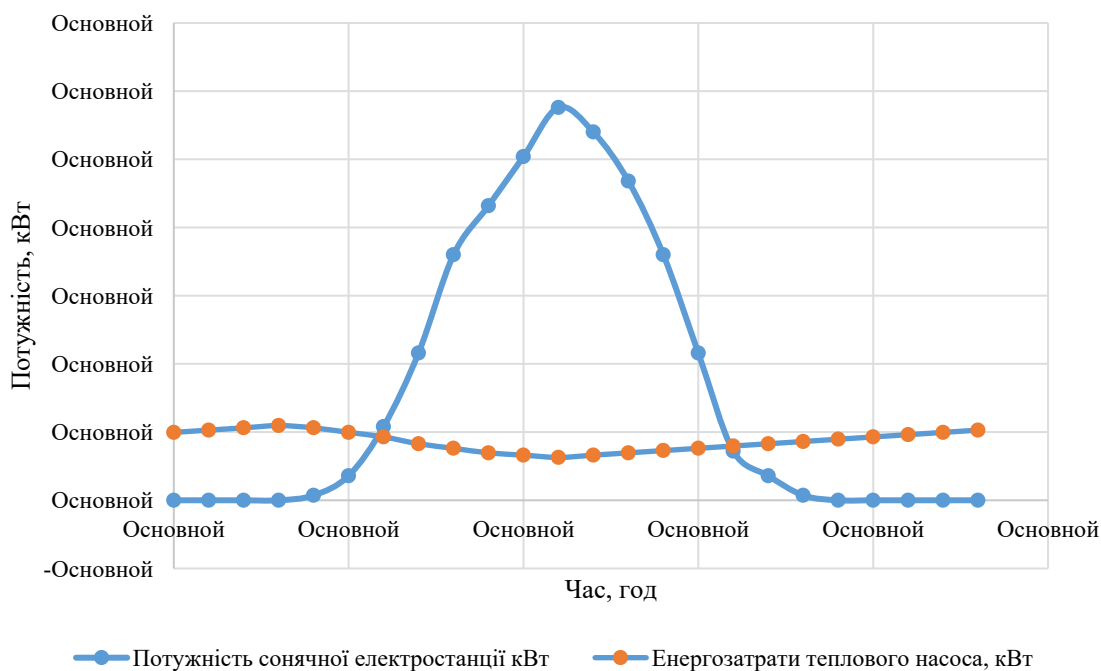


Рис. 2. Моделювання взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у складі локальної системи енергозабезпечення багатоквартирного будинку

щонайменше 10 годин на добу в умовах типового зимового дня, що дозволяє значно зменшити залежність від централізованого електропостачання. Ефективна взаємодія теплового насоса та сонячної електростанції сприяє зниженню загального енергоспоживання з мережі, зменшенню експлуатаційних витрат та обсягів викидів CO₂. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження гібридних енергетичних систем у житловому секторі як одного з напрямів забезпечення енергоефективності та екологічної сталості.

Разом з тим, дослідження має узагальнений характер. Його результати є концептуальною основою для подальшої прикладної роботи, що передбачає обрання типового багатоквартирного житлового будинку, складання цифрового двійника системи енергозабезпечення та верифікацію математичної моделі за експериментальними

даними. У процесі розробки цифрового двійника планується відокремити дві підсистеми: моделювання генерації та споживання електричної енергії для загальнобудинкових потреб (ліфти, насоси, освітлення), а також моделювання теплового насоса як споживача електроенергії від СЕС і мережі та, одночасно, джерела теплової енергії для системи опалення та гарячого водопостачання. Очікуваним результатом подальших досліджень стане методика оптимізації потужності теплового насоса, вибору об'ємів теплоаккумуляторів та аккумуляторів електроенергії залежно від кількості мешканців та характеристик будівлі.

Отримані результати можуть бути використані для попередньої оцінки ефективності впровадження гібридних енергосистем у житлових будівлях та для прийняття обґрунтованих рішень щодо енергетичної модернізації будинків.

Список літератури:

1. 10-year simulation of photovoltaic-thermal road assisted ground source heat pump system for accommodation building heating in expressway service area / B. Xiang et al. *Solar Energy*. 2021. Vol. 215. P. 459–472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.056> (date of access: 24.06.2025).
2. Assessing mixed-integer-based heat pump modeling approaches for model predictive control applications in buildings / L. Maier et al. *Applied energy*. 2022. Vol. 326. P. 119894. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119894> (date of access: 24.06.2025).
3. Byrne P. Research summary and literature review on modelling and simulation of heat pumps for simultaneous heating and cooling for buildings. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 10. P. 3529. URL: <https://doi.org/10.3390/en15103529> (date of access: 24.06.2025).

4. District heating planning with focus on solar energy and heat pump using GIS and the supervised learning method: Case study of Gaziantep, Turkey / S. Eslami et al. *Energy conversion and management*. 2022. Vol. 269. P. 116131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116131> (date of access: 24.06.2025).
5. Dumoulin R., Rounis E. D., Athienitis A. Operation and grid interaction modeling of a house with a building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) system coupled to an air-source heat pump. *Science and technology for the built environment*. 2021. Vol. 27, № 9. P. 1311–1329. URL: <https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1941247> (date of access: 24.06.2025).
6. Dynamic modelling of geothermal heat pump system coupled with positive-energy building / V. Battaglia et al. *Energy*. 2023. Vol. 284. P. 128557. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128557> (date of access: 24.06.2025).
7. Experimental investigation on a combined solar and ground source heat pump system for a single-family house: energy flow analysis and performance assessment / C. Zhang et al. *Energy and buildings*. 2021. Vol. 241. P. 110958. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110958> (date of access: 24.06.2025).
8. Gagliano A., Tina G. M., Aneli S. Improvement in energy self-sufficiency in residential buildings using photovoltaic thermal plants, heat pumps, and electrical and thermal storage. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 5. P. 1159. URL: <https://doi.org/10.3390/en18051159> (date of access: 24.06.2025).
9. Integrated operation of PV assisted ground source heat pump and air source heat pump system: performance analysis and economic optimization / Z. Zheng et al. *Energy conversion and management*. 2022. Vol. 269. P. 116091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116091> (date of access: 24.06.2025).
10. Transient performance simulation and technoeconomic assessment of a smart building energy plant driven by solar energy coupled to a reversible heat pump / T. Hai et al. *Journal of cleaner production*. 2023. Vol. 405. P. 136946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136946> (date of access: 24.06.2025).

Politykin M.V. MODELING THE INTERACTION OF A HEAT PUMP AND A SOLAR POWER PLANT IN THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF AN APARTMENT BUILDING

The purpose of this study is to investigate the adsorption of glyphosate by carbon sorbents, particularly multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), to establish optimal conditions and parameters for the effective removal of this pesticide from water sources. The research involved the use of Multi-walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) with a diameter of 5–15 nm. The study examined the impact of physicochemical properties of sorbents, temperature, and glyphosate concentration on the adsorption process. Methods were developed to assess the adsorption characteristics of carbon nanotubes. Kinetic and thermodynamic analyses were carried out to elucidate the mechanism of adsorption. Experimental output curves were obtained at +20 (±0.5) °K, and for zeolite particles with a diameter of 1 mm, the effective internal diffusion coefficient was determined to be $2.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

The study found that carbon sorbents, including MWCNTs, exhibit high efficiency in removing glyphosate from aqueous environments. The results highlight the importance of adsorption parameters and sorbent properties in optimizing glyphosate removal. Kinetic and thermodynamic evaluations provided a deeper understanding of the adsorption process. This research provides a novel analysis of glyphosate removal using carbon nanomaterials and presents newly developed methods for evaluating their adsorption properties. It also includes detailed thermodynamic and kinetic assessments, which are not commonly addressed in conventional studies on pesticide adsorption.

The findings can support the development of effective water purification systems using carbon sorbents to reduce pesticide contamination. The study offers insight into the duration and source identification of glyphosate pollution, contributing to environmental monitoring and mitigation efforts. Carbon-based sorbents, particularly MWCNTs, have high potential for practical application in water treatment systems aimed at removing glyphosate. Understanding their adsorption behavior, influenced by physicochemical and environmental factors, enables the development of efficient methods for protecting water resources and the broader ecosystem.

Key words: heat pump, solar power plant, hybrid power system, energy efficiency, modeling, heating, renewable energy sources, energy consumption optimization.

Дата надходження статті: 14.07.2025

Дата прийняття статті: 21.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

УДК 621.577:697.34
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/21>

Ткаченко М.В.

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

Риндюк Д.В.

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

ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ НА БАЗІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

У статті розглянуто проблему зменшення енергоспоживання та викидів парникових газів у житловому секторі вимагає впровадження високоефективних та екологічно безпечних технологій теплопостачання. З огляду на значне зростання цін на традиційні енергоносії та актуальність декарбонізації опалювальних систем, використання теплових насосів є перспективним напрямом модернізації енергетичної інфраструктури. Особливої ваги це питання набуває в умовах кліматичної адаптації та підвищення енергоефективності будівельного фонду.

Показані переваги теплових насосів: високий коефіцієнт перетворення енергії, відсутність шкідливих викидів, гнучкість застосування та довговічність. Водночас визначено й обмеження: висока початкова вартість, зниження ефективності при низьких температурах, потреба в кваліфікованому обслуговуванні та відсутність державної підтримки в Україні.

Окрему увагу приділено екологічним аспектам, зокрема переходу до безпечніших холодоагентів із низьким потенціалом глобального потепління. Метою роботи є оцінка техніко-економічної ефективності застосування повітряного теплового насоса для опалення приватного будинку в умовах помірного клімату України та порівняння його експлуатаційних характеристик із електричним котлом.

У роботі застосовано методи теплотехнічного розрахунку, аналізу енергоспоживання, сезонної динаміки зовнішньої температури, а також техніко-економічного порівняння опалювальних систем за критеріями спожитої енергії, коефіцієнта ефективності та вартості експлуатації.

Проаналізовано технічні характеристики теплового насоса Misco BEEHeat типу «повітря-вода» з номінальною тепловою потужністю 16,2 кВт і результати його практичного застосування у будинку площею 150 м². З урахуванням погодинного розподілу зовнішньої температури для регіону Києва визначено необхідне теплове навантаження в розрізі опалювального періоду. Встановлено, що середній сезонний коефіцієнт ефективності теплового насоса становить 3,14, а загальне енергоспоживання системи з урахуванням пікового навантаження – 8785 кВт·год. При порівнянні з електрокотлом, що споживає 27159 кВт·год за той самий період, економія становить понад 79 тисяч гривень за сезон. Побудовано графік покриття теплових втрат у залежності від температури та визначено точку бівалентності системи. Досліджено умови стабільної роботи обладнання при температурах до -22 °С.

Практична цінність роботи полягає в демонстрації реального потенціалу впровадження теплових насосів у приватному секторі України як альтернативи електричному опаленню. Отримані результати можуть бути використані для попереднього техніко-економічного обґрунтування вибору обладнання, планування інвестицій у термомодернізацію та оптимізації енергоспоживання будівель.

Ключові слова: тепловий насос, система опалення, енергоефективність, повітряне джерело теплоти, коефіцієнт перетворення енергії, енергоспоживання, техніко-економічна оцінка, альтернативне теплопостачання, термомодернізація.

Постановка проблеми. Використання теплових насосів для опалення приміщень, визначення термінів їх окупності та реальної економії при експлуатації на території України.

Однією з ключових проблем ХХІ століття є необхідність мінімізації негативного впливу людської діяльності на довкілля, спричиненого спалюванням викопного палива, такого як

нафта, вугілля та природний газ. Процеси видобутку, переробки, транспортування та згоряння цих ресурсів призводять до викидів парникових газів в атмосферу, що викликає серйозні екологічні наслідки, зокрема екстремальні погодні явища: тривалі посухи, посилення хвиль спеки, збільшення лісових пожеж, інтенсивні опади та затоплення прибережних територій [1, 2]. Для протидії цим загрозам необхідно активно впроваджувати відновлювані джерела енергії. Також умовах зростання вартості традиційних енергоносіїв, посилення вимог до енергоефективності будівель та необхідності скорочення викидів парникових газів особливої актуальності набуває питання впровадження енергоощадних та екологічно безпечних технологій теплопостачання. В приватному житловому секторі України одним із найпоширеніших засобів опалення залишаються електричні котли, застосування яких, незважаючи на технічну простоту, супроводжується високим рівнем споживання електроенергії та обмеженими можливостями щодо підвищення енергоефективності.

У цьому контексті все більше уваги привертають теплові насоси (ТН) як альтернатива традиційним джерелам теплопостачання. Їх впровадження може суттєво зменшити споживання енергії, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити відповідність сучасним екологічним стандартам. Проте ефективність роботи теплових насосів значною мірою залежить від кліматичних умов, що зумовлює необхідність аналізу їх доцільності з урахуванням регіональної специфіки.

Таким чином, актуальною є науково обґрунтована оцінка ефективності функціонування систем опалення на базі теплових насосів у порівнянні з електричними котлами в умовах помірного клімату України. Такий аналіз є необхідним для прийняття техніко-економічно доцільних рішень при модернізації систем опалення в приватному секторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження показують пряму залежність між зростанням населення, споживанням первинної енергії та рівнем викидів CO₂. Прогнозується, що між 1990 і 2040 роками глобальне енергоспоживання зросте на 136%, а викиди CO₂ – на 110%, що значно перевищує темпи приросту населення (72%). Головною причиною цього є збільшення попиту на енергію на душу населення.

З метою стимулювання використання відновлюваної енергії уряди та міжнародні організації впроваджують різноманітні стратегії та політики. Одним із прикладів є Закон Великобританії про

зміну клімату 2008 року [3], який спрямований на зменшення викидів парникових газів та перехід до більш сталих енергетичних рішень.

Зі зростанням попиту на енергію та підвищеною увагою до використання низькопотенційних джерел теплоти теплові насоси стали однією з ефективних технологій у сфері відновлюваної енергетики. Тепловий насос (ТН) є енергоефективним, екологічним, легким в автоматизації та зручним в експлуатації теплогенеруючим обладнанням, яке з точки зору вибору джерела теплоти є досить гнучким рішенням, що має високий рівень надійності в експлуатації. Такі переваги теплонасосних технологій дали потужний поштовх для їх популярності та впровадження в багатьох країнах світу. На сьогодні в світі встановлено та експлуатується сотні мільйонів ТН, що говорить про їх популярність, надійність, енергетичну та економічну ефективність [4]. Теплові насоси стали ключовою технологією для досягнення кліматичних цілей у ЄС та інших регіонах світу. Починаючи з 2020 року програми Horizon Europe фінансують дослідження з інтеграції теплових насосів із відновлюваними джерелами енергії, а також розробку низькопотенційних геотермальних систем [7]. У США велика увага приділяється модернізації теплових насосів для холодних кліматичних умов, зокрема у північних штатах. Дослідницькі центри за підтримки Міністерства енергетики [8] працюють над удосконаленням двоступеневих і змінночастотних компресорів, що дозволяють досягти вищої сезонної ефективності (SEER, HSPF). Крім того, актуальними є дослідження впливу нових екологічно безпечних холодоагентів із низьким GWP (Global Warming Potential), таких як R-1234yf і CO₂. У Японії провідні компанії, як-от Mitsubishi та Daikin, активно впроваджують інтелектуальні системи керування, що дозволяють оптимізувати роботу теплового насоса в режимі реального часу, використовуючи алгоритми машинного навчання [9]. Таким чином можемо зробити висновок, що теплові насоси мають високий потенціал застосування в енергетиці, а останні дослідження спрямовані на підвищення їх ефективності та інтеграцію в різні системи розумного будинку. Також поширені гібридні конфігурації ТН, що поєднують теплові насоси з традиційними опалювальними системами або іншими відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі [11]. Одну з таких схем розглянуто в статті [12], де для підігріву робочої рідини, в ролі якої виступає 35%-ний водний розчин пропіленгліколю, вико-

ристовують теплоту сонячної радіації, використовуючи зміювик контактний теплообмінник. Розглянемо основні типи теплових насосів, принципи їх роботи та ключові відмінності.

Теплові насоси типу «повітря-вода» використовують енергію з навколишнього повітря та передають її через водяну систему опалення, зокрема через радіатори або теплу підлогу. Системи «повітря-повітря» розподіляють нагріте або охолоджене повітря по приміщеннях за допомогою повітроводів. Повітряні теплові насоси (ASHP) особливо ефективні для міських і щільно забудованих районів, де встановлення ґрунтових систем може бути неможливим [13]. Проте їхня ефективність знижується в умовах сильного холоду або підвищеної вологості [14]. У дослідженні [15] обґрунтовано конструкцію теплових насосів типу «повітря-вода», акцентуючи увагу на їхній простоті встановлення та відсутності необхідності в отриманні спеціальних дозволів на підключення. Відзначено екологічну безпеку й енергоефективність таких систем, що дозволяє розглядати їх як перспективний напрям у розвитку сучасних систем теплопостачання. Теплові насосні установки функціонують за рахунок споживання електроенергії, при цьому не лише генеруючи тепло, а й забезпечуючи кондиціювання повітря. Ефективність роботи визначається співвідношенням між спожитою енергією та обсягом отриманого тепла. Згідно з експертними оцінками [15], до 2035 року понад 70% теплової енергії для потреб опалення та гарячого водопостачання в економічно розвинених країнах вироблятимуть теплові насосні установки, що використовують різноманітні низькопотенційні джерела теплоти. Автори [16] відмічають такі основні переваги ТН типу «повітря-вода»:

Економічна доцільність. Теплові насоси характеризуються високим коефіцієнтом перетворення енергії (COP), який, залежно від експлуатаційних умов, може становити від 300 до 700 %. Це означає, що на кожен кіловат спожитої електроенергії система здатна генерувати від 3 до 7 кВт теплової енергії. Така ефективність сприяє зниженню енергоспоживання при забезпеченні теплового комфорту в будівлях та організації гарячого водопостачання. Окрім цього, функціонування теплових насосів не вимагає використання традиційного палива, що усуває потребу в його закупівлі, транспортуванні та зберіганні, а отже, зменшує загальні експлуатаційні витрати.

Підвищений комфорт. Системи теплових насосів не вимагають облаштування спеціальних

приміщень котельні чи отримання погоджень у відповідних інстанціях. Вони характеризуються стабільною роботою, забезпечують мінімальні коливання температури й вологості в приміщенні, а також мають широкі можливості програмного керування.

Екологічна безпека. Експлуатація теплових насосів не супроводжується викидами діоксиду вуглецю, оксидів азоту та інших токсичних сполук, що дозволяє істотно знизити антропогенне навантаження на навколишнє середовище. Це, зокрема, сприяє зменшенню ризику утворення кислотних опадів і має позитивний ефект для збереження озонового шару. Крім того, застосування екологічно безпечних холодоагентів і відсутність горючих речовин унеможливорює виникнення додаткових ризиків, пов'язаних з алергенністю або пожежною небезпекою.

Надійність експлуатації. Обладнання має високий рівень надійності, стійке до перепадів напруги та не потребує частого технічного обслуговування. Орієнтовний термін служби теплового насоса становить не менше 25 років.

Гнучкість застосування. Системи легко інтегруються з будь-якими циркуляційними схемами опалення, а також можуть бути використані для охолодження приміщень у літній період.

Універсальність. Застосування теплових насосів можливе як у приватному житловому, так і у промисловому будівництві, що робить цю технологію універсальним рішенням для широкого спектру об'єктів.

Основними недоліками даних систем є їх вартість та зменшення ефективності при зниженні температури навколишнього середовища при роботі в режимі опалення. Але розвиток технологій та збільшення потужностей виробництва [17] дозволили за останні роки зменшити вартість обладнання та впровадити моделі, які працюють при температурах -30С.

Ґрунтові теплові насоси (GSHP), відомі також як геотермальні, забезпечують стабільнішу роботу завдяки відносно постійній температурі ґрунту. Вони можуть використовувати вертикальні або горизонтальні контури трубопроводів для теплообміну [18]. Однак їх встановлення потребує значних земельних площ, що ускладнює використання в густонаселених містах. У певних кліматичних умовах ґрунтові теплові насоси (ТН) є технічно обґрунтованою та ефективною технологією для забезпечення опалення, охолодження й гарячого водопостачання будівель [19]. Серед ключових переваг таких систем варто відзначити

знижену потребу в електроенергії, мінімальні експлуатаційні витрати та низькі вимоги до технічного обслуговування, що у комплексі забезпечує зменшення загальних річних витрат користувача [20]. Як зазначено у літературі [23], ефективність функціонування ґрунтових теплових насосів значною мірою залежить від метеорологічних умов і теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій. Зокрема, у кліматичних зонах із переважанням режиму охолодження виникає сезонний дисбаланс теплонавантажень, коли влітку теплота інтенсивно передається до ґрунту, тоді як взимку вона виймається в меншій кількості. Це призводить до поступового підвищення температури ґрунту та зниження ефективності теплообмінного процесу з часом [24, 25].

Питання ефективності теплових насосів цього типу ґрунтовно розглянуто у праці [26], де було проаналізовано як переваги, так і наявні обмеження застосування запропонованої теплонасосної системи. Повітряні теплові насоси (ASHP) є найпоширенішим варіантом в Україні, оскільки

потребують менше місця, ніж ґрунтові аналоги [27]. Очікується, що вони відіграватимуть важливу роль у переході на електричне опалення, особливо під час модернізації старих будівель. Проте слід враховувати високі капітальні витрати на оновлення існуючих систем опалення та експлуатаційні витрати, які можуть перевищувати витрати на традиційні газові котли [28]. Надійність, правильне проектування та узгоджена робота кожного з компонентів є критичними для досягнення високої продуктивності та енергоефективності теплового насоса.

На Рис. 1 зображено принципову схему повітряного теплового насоса на основі теплового насосу MyCond BeeHeat [29].

Традиційно в теплових насосах використовувалися гідрохлорфторвуглеводні (HCFC) і гідрофторвуглеводні (HFC), зокрема R-22 та R-410A. Хоча вони мають високі енергетичні характеристики, їхній потенціал глобального потепління (GWP) залишається надзвичайно високим – наприклад, GWP для R-410A становить приблизно

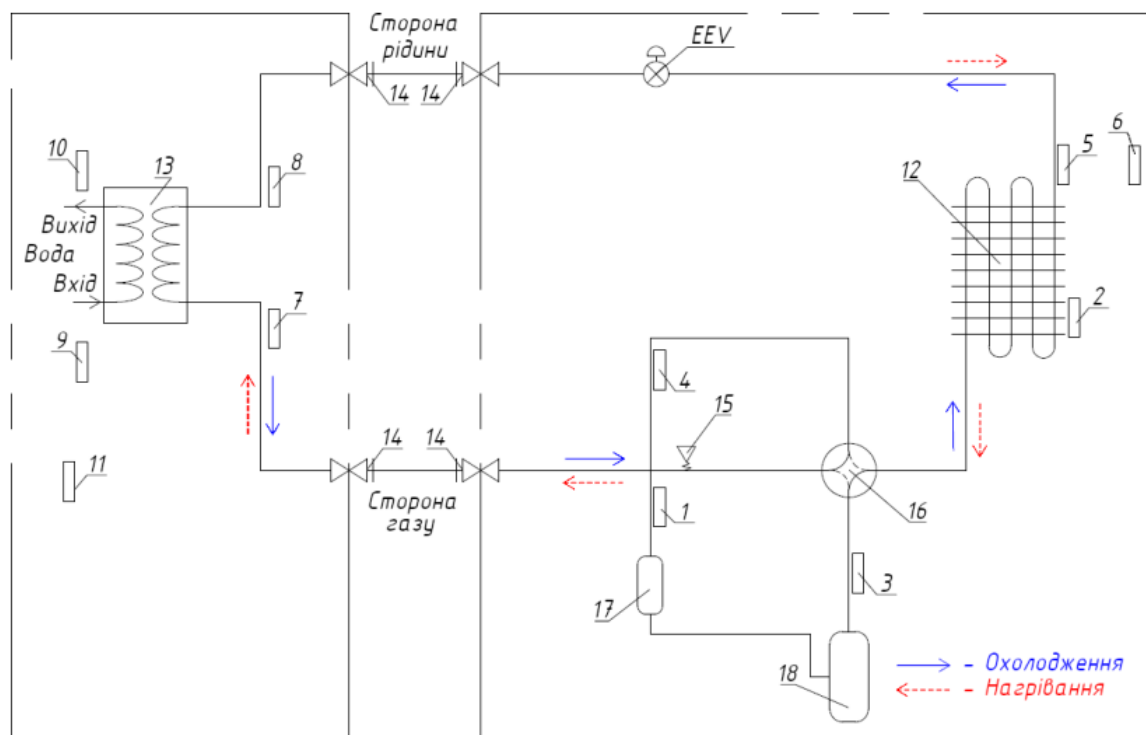


Рис. 1. Принципова схема повітряного теплового насоса

1 – датчик тиску; 2 – середній датчик температури конденсатора; 3 – датчик температури на виході з компресора; 4 – датчик температури труби всмоктування компресора; 5 – датчик температури конденсатора; 6 – датчик температури зовнішнього повітря; EEV – електронний розширювальний клапан; 7 – датчик температури випарника на виході; 8 – датчик температури випарника на вході; 9 – датчик температури води на вході; 10 – датчик температури води на виході; 11 – дистанційний датчик температури повітря; 12 – теплообмінник зовнішнього боку; 13 – пластинчастий теплообмінник внутрішнього боку; 14 – сервісний триходовий клапан; 15 – датчик тиску; 16 – чотириходовий клапан; 17 – накопичувач; 18 – компресор; EEV – електронний розширювальний вентиль

2088 (у CO₂-еквіваленті). У зв'язку з цим сучасна тенденція в ЄС, Японії та США – перехід до низько-GWP речовин, таких як R-32 (GWP ≈ 675), R-290 (пропан, GWP ≈ 3) та CO₂ (R-744, GWP = 1). Наприклад, R-32, що є заміною для R-410A, забезпечує до 10% вищу енергоефективність та знижує екологічне навантаження. Проте через його легку займистість (клас A2L) потрібні спеціальні заходи безпеки при монтажі та експлуатації [30]. Особливої уваги заслуговує CO₂ (R-744), що є природним холодоагентом з нульовим озоноруйнівним потенціалом (ODP = 0) і найнижчим GWP серед усіх доступних варіантів. CO₂ все частіше використовується у високотемпературних теплових насосах, зокрема для ГВП (гарячого водопостачання) та в комерційних застосуваннях [31, 32]. Незважаючи на високий робочий тиск, новітні інженерні рішення дозволяють безпечно інтегрувати такі системи навіть у житлових об'єктах. Згідно з Європейським регламентом F-Gas (Регламент (ЄС) № 517/2014), планується етапне зниження використання HFC на 79% до 2030 року, що стимулює розробку та впровадження альтернативних рішень із низьким або нульовим GWP.

Тепловий насос працює на основі принципу зворотного циклу Карно, який є теоретичною моделлю максимально ефективного теплового двигуна [33]. На рис. 1.2 показано принцип роботи теплового насоса, який полягає у перенесенні теплової енергії з однієї зони в іншу за допомогою фізичних процесів випаровування та конденсації холодоагенту.

Енергоефективність теплових насосів (ТН) визначається шляхом співвідношення кількості виробленої теплової енергії до спожитої електроенергії. Цей показник оцінюється за коефіцієнтом

продуктивності (COP), який відображає відношення потужності нагріву або охолодження (Q) у кіловатах до потужності, що споживається насосом (W), також важливим показником є SPF, який відповідає Директиві ЄС щодо відновлюваної енергії [34], яка визначає відновлювану складову теплоти, що виробляється ТН, і регламентує мінімальне значення $SPF \geq 2,88$ для їхньої класифікації як відновлюваних джерел теплоти [35]. Фактична ефективність ТН може суттєво відрізнятися від заявлених виробником параметрів, оскільки вона залежить від кліматичних умов та характеристик будівлі. Відновлюваними джерелами енергії для ТН вважаються аеротермальні, геотермальні та гідротермальні джерела [36]. Однак перед їх використанням необхідно провести оцінку відповідності нормативним вимогам щодо відновлюваних джерел енергії [36].

Європейський ринок теплових насосів демонструє стабільне зростання: якщо у 2014 році було продано 7,5 мільйона одиниць, то у 2018 році цей показник досяг 11,8 мільйона. Найбільш популярними залишаються повітряні теплові насоси (ASHP) [37]. Політика ЄС сприяє розвитку відновлюваних технологій, заохочуючи їх впровадження і в Україні [38].

Теплові насоси набувають популярності серед споживачів, які прагнуть перейти від традиційних систем опалення на вичерпному паливі до більш екологічних рішень. Вони допомагають зменшити витрати на енергоресурси, скоротити викиди вуглекислого газу та покращити якість повітря. Використання цих технологій [39] у сфері опалення, вентиляції та кондиціонування сприяє зниженню залежності від невідновлюваних джерел енергії та підвищенню енергетичної безпеки.

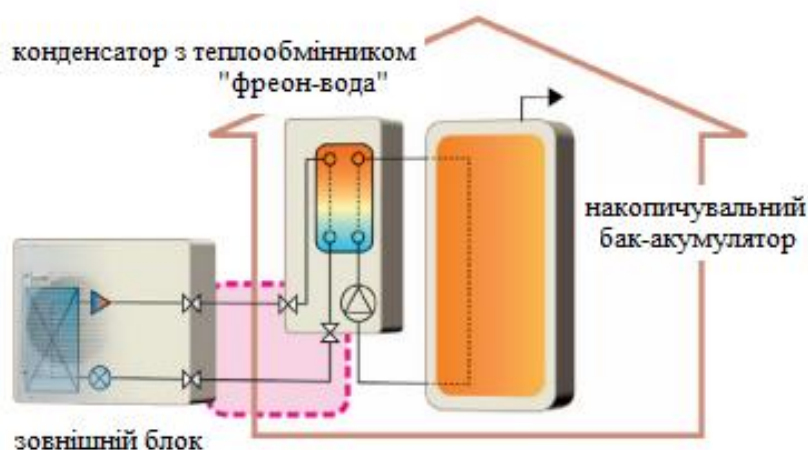


Рис. 2. Принципова схема роботи теплового насоса

Найбільший інтерес у світі викликає застосування теплонасосних технологій саме в комунальному теплогенеруванні. Матеріали конференцій акцентують на стабільному зростанні кількості ТН-установок у системах опалення житлового фонду, який є основним споживачем теплової енергії. Так, у США частка теплонасосів у системах опалення перевищує використання традиційних джерел на основі органічного палива на 22% [40].

Суттєвим переломним моментом у сфері глобальної енергетики стало повномасштабне військове вторгнення Росії в Україну 24 лютого 2022 року. Енергетична й екологічна криза, що виникла внаслідок цих подій у Європі, суттєво змінила ставлення пересічних споживачів до джерел теплової енергії. Європейський енергетичний сектор стрімко переходить на альтернативні джерела, тоді як Росія традиційно використовує свої енергоресурси як інструмент політичного тиску. У матеріалах конференцій Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) [40, 41, 42] та публікаціях журналу Heat Pump Center наведено приклади реалізованих проєктів із терміном окупності, що становить від 9 місяців до 2 років. Тривале і стрімке зростання цін на природний газ протягом останніх років значною мірою зробило систему централізованого теплопостачання в Україні економічно нерентабельною. Очікується, що найбільші зміни впродовж наступних 10 років відбудуться в секторах житлового та цивільного будівництва [43]. За прогнозами, до 2030 року близько 250–300 тисяч багатоквартирних будинків потребуватимуть утеплення [44]. Можна зробити висновки, що ехнологія ТН поступово витісняє котли на ринку опалення.

Постановка завдання. Оскільки все більше власників індивідуальних житлових будинків обирають цю технологію як альтернативу традиційним способам опалення, враховуючи її енергоефективність та екологічність. Окремі пілотні проєкти впроваджуються у закладах соціальної інфраструктури (школи, дитсадки), зокрема за підтримки міжнародних донорів [45]. Однак широкому впровадженню теплових насосів в Україні заважають кілька факторів. По-перше, висока початкова вартість обладнання та монтажу залишається основним стримувальним чинником для більшості споживачів [46]. По-друге, спостерігається нестача кваліфікованих спеціалістів для проєктування, встановлення та обслуговування таких систем. Нарешті, законодавча база лише частково регулює питання підтримки впрова-

дження теплових насосів, і відсутність державних програм стимулювання не сприяє їхньому масовому розповсюдженню [47]. Попри це, потенціал застосування теплових насосів в Україні значний. Найперспективнішими сферами є приватні будинки, об'єкти житлово-комунального господарства (ЖКГ), а також промисловість, де теплові насоси можуть забезпечувати як опалення, так і охолодження з високим коефіцієнтом перетворення енергії [48]. У порівнянні з іншими альтернативами, такими як твердопаливні котли або електроопалення, теплові насоси є більш енергоефективними (коефіцієнт продуктивності COP сягає 3–4) та екологічно безпечними, адже не створюють викидів під час експлуатації. Твердопаливні котли хоч і дешевші у встановленні, однак потребують постійного обслуговування і створюють додаткове екологічне навантаження. Електроопалення, натомість, суттєво підвищує навантаження на електромережу і має високі експлуатаційні витрати [49]. Термін окупності теплового насоса залежить від його типу, вартості встановлення та вартості енергоносіїв, що замінюються. У середньому для повітряного теплового насоса термін окупності становить 2–5 років, а для геотермального – до 10 років через вищу вартість монтажу. Наприклад, при заміні електроопалення тепловим насосом з COP = 3 економія на споживанні електроенергії може сягати 60–70%. У приватному будинку з річним споживанням 15 000 кВт·год це дозволяє заощадити до 40–60 тис. грн на рік. З урахуванням вартості обладнання (150–250 тис. грн), окупність настає в середньому за 3–6 років. Тому виникає необхідність на прикладі реального об'єкту визначити, наскільки ефективнішим буде система опалення на базі теплового насоса повітря-вода, та скільки коштів вона зможе зекономити при експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо прорахунок ефективності теплового насоса типу повітря-вода на базі об'єкту приватний будинок площею 150 м² та порівняємо його з електрокотлом. За розрахункові тепловтрати приймаємо 12 кВт, джерелом опалення буде виступати тепловий насос MyCond BeeHeat MHSN/U16BH [29].

З технічної документації на дане обладнання, та даних по розрахунковій температурі зовнішнього середовища (для Київської області -22°C) на рисунку 1.3 розглянемо графік потреби в опаленні об'єкта та фактичну потужність теплового насоса. Також на графіку показано точку бівалентності, при якій фактичної потужності ТН не вистачає для покриття тепловтрат приміщення. Також на

Таблиця 1

Технічні характеристики	Од.	MHSN/U16BH
Теплова потужність (A7/W35)	кВт	16,2
COP (A7/W35)	4,4	
Теплова потужність мін/макс (A7/W35)	кВт	6,6-16,5
Максимальна теплова потужність (A-7/W35)	кВт	13,5
COP (A-7/W35)	2,6	
Потужність охолодження (A35/W7)	кВт	14
EER	2,5	
Діапазон зовнішньої температури в режимі нагріву (ГВП)	°C	-25...+30 (+43)
Діапазон зовнішньої температури в режимі охолодження	°C	+18...+43
Максимальна температура подачі	°C	60
Холодоагент (тип)	R32	
Живлення	В / Гц	400 / 50
Рівень звукової потужності (внутр. / зовн. блок)	дБ(А)	42 / 68
Клас енергоефективності		
- Низькотемпературна експлуатація (W35)	A+++	
- Середньотемпературна експлуатація (W55)	A++	

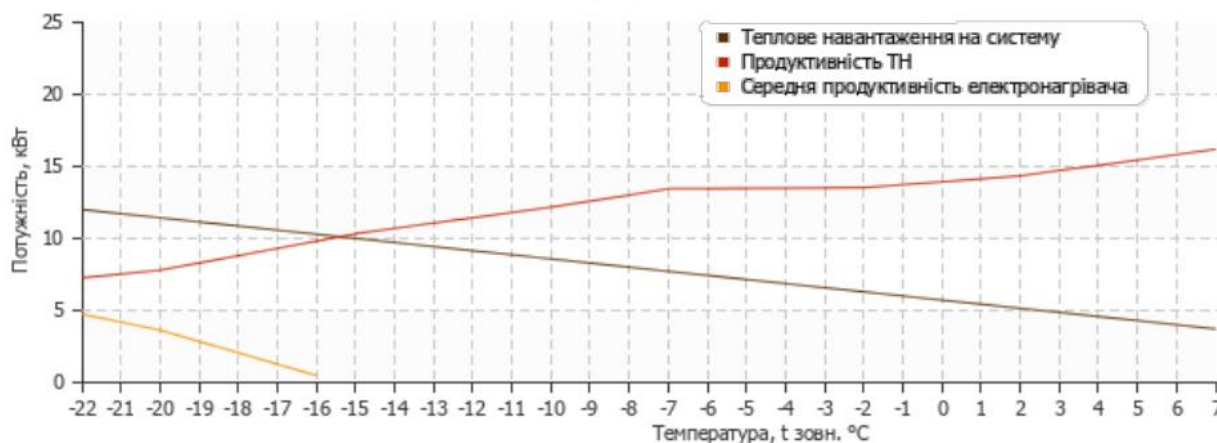


Рис. 3. Графік залежності тепловтрат будинку від температури зовнішнього середовища та фактична потужність ТН

графіку показано потужність пікового джерела, яким в даному випадку виступає трубчастий електронагрівач (ТЕН).

Необхідна продуктивність ТН (кВт): необхідна теплова потужність теплового насоса для повного покриття тепловтрат при заданій розрахунковій температурі.

Розрахункова температура (°C): мінімальна розрахункова температура ($t_{\text{зовн.}}$ °C) зовнішнього повітря. Приймається за статистичними кліматичними даними в місці установки ТН.

Температура без навантаження (°C): ТН не працюватиме на опалення, якщо температура зовнішнього повітря вище даного значення.

Додаткова теплова потужність (кВт): теплопродуктивність додаткового джерела тепла, яка

відраховується від розрахункової точки бівалентності ($T_{\text{розр.}}$)

Точка бівалентності (°C): розрахункова мінімальна температура зовнішнього повітря, при якій ТН повністю (на 100%) покриває тепловтрати будівлі.

Оскільки в опалювальний період температура зовнішнього середовища не є постійною, це треба враховувати при оцінці ефективності роботи обладнання. При зниженні температури навколишнього середовища, знижується ефективність ТН. Для моделі теплового насосу MyCond BeeHeat MHSN/U16BH COP при температурі навколишнього середовища +8°C складає 4,61, а при -22°C – 1,66 відповідно. Тому для правильного розрахунку, необхідно враховувати ці фак-

тори. Також слід враховувати, що при низьких температурах зовнішнього середовища збільшуються тепловтрати самого приміщення і при температурах нижче -16°C (точка бівалентності) теплової потужності теплового насосу буде не вистачати для покриття цих тепловтрат. Саме для цього використовується додаткове джерело живлення (пікове джерело), яким в нашому випадку виступає трубчастий електронагрівач (ТЕН). Цей нагрівальний пристрій, який вмонтований в корпус гідромодулю догріває теплоносії, коли не вистачає потужності ТН. Тому затрати на електроенергію будуть сумою безпосередньо ТН та пікового джерела (ТЕН).

Використавши дані, про температуру зовнішнього середовища [50] в м.Київ та Київській області, використавши дані про COP обладнання при цих температурах [56] отримаємо дані по спожитих енергоресурсах ТН та продуктивності підібраного обладнання, які занесемо в Таблицю 3.

Для розрахунку вартості експлуатації обладнання використовуємо отримані дані по тепловому навантаженню будинку за весь період, та враховуючи вартість електроенергії для побутових споживачів на рівні 4,32 грн./кВт. ККД електричного котла для спрощення розрахунків приймаємо за 100%. Дані отримані при опаленні електродомом заносимо в Таблицю 4.

Аналогічно прораховуємо вартість для ТН, де частина енергоресурсів буде спожита безпосередньо тепловим насосом, а частина вбудованим електронагрівачем та занесемо отримані дані в Таблицю 5.

Таким чином ми визначили середні експлуатаційні витрати на електроенергію за опалювальний період при використанні електричного котла та теплового насосу повітря-вода з вбудованим ТЕНом. Для наглядності побудуємо порівняльний графік на Рисунку 4.

Таким чином порівнявши затрати на електроенергію за один опалювальний сезон в будинку площею 150 м^2 розташованого в м. Київ економія в вартості експлуатації системи опалення між тепловим насосом Muscond BeeHeat та електродомом за опалювальний сезон складає **79 377 грн.**

Висновки. Теплові насоси демонструють високу довгострокову ефективність завдяки стабільно високому коефіцієнту перетворення енергії (COP), який у більшості сучасних моделей становить 3–5. Це означає, що на кожен 1 кВт спожитої електроенергії виробляється 3–5 кВт теплової енергії. За умови правильного проєктування і регулярного технічного обслуговування тепловий насос може ефективно працювати 15–20 років. Протягом цього періоду споживачі отримують значну економію на витратах на опалення, особливо у порівнянні з електроопаленням або традиційними системами на викопному паливі. Крім того, стабільність цін на електроенергію у порівнянні з газом або твердим паливом робить експлуатаційні витрати прогнозованими, що важливо для довгострокового енергетичного планування [49]. Попри очевидні переваги теплових насосів як енергоефективного та екологічного джерела теплопостачання, їх широке впровадження в Україні стикається з рядом серйозних проблем. Насамперед, це високі початкові інвестиції. Встановлення сучасної системи теплового насоса разом із проєктуванням, бурінням (у разі геотермальних систем) або зовнішнім монтажем (для повітряних) може сягати 150–300 тис. грн для приватного будинку. Такий рівень витрат є стримувальним чинником для середньостатистичного українського споживача [46]. Крім того, існує розрив між вимогами ДБН (державних будівельних норм) та сучасною практикою монтажу, що створює правову невизначеність для проєктувальників і забудовників [51]. Третім важливим викликом є сезонна ефективність теплових насосів,

Таблиця 2

Розрахункові характеристики ТН

Пункт	Позначення	Значення
Необхідна теплопродуктивність для даного об'єкта, кВт	$P_{\text{розр.}}$	12
Розрахункова температура, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{розр.}}$	-22
Температура без навантаження, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{б/н}}$	12
Річне навантаження, кВт·год	кВт	27119,32
Точка бівалентності, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{бів.}}$	-15,42
Потреба в додатковому електронагрівнику, кВт·год	кВт	166,39
Разом	Позначення	Значення
Сумарна теплопродуктивність ТН, кВт·год	CAP	26952,93
Сумарна споживана потужність ТН, кВт·год	$P_{\text{спож.}}$	8160,64

Таблиця 3

Розрахунок експлуатаційних витрат на систему опалення теплового насосу типу спліт Mycond BeeHeat

Інтервал температури повітря, °С	Години стояння температур	Необхідне навант. за годину, кВт	Фактична продуктивність підбраного обладнання, кВт	Покриття навант. піковим джерелом, кВт	Загальне навант. за опал. період, кВт
-22/-20,1	9	12	7,33	4,68	108
-20/-18,1	26	11,14	8,02	3,12	290
-18/-16,1	44	10,57	9,32	1,26	465
-16/-14,1	70	10	10,61		700
-14/-12,1	105	9,43	11,57		990
-12/-10,1	131	8,86	12,52		1160
-10/-8,1	166	8,29	13,17		1375
-8/-6,1	237	7,71	13,82		1828
-6/-4,1	301	7,14	13,86		2150
-4/-2,1	403	6,57	13,89		2648
-2/-0,1	526	5,71	14,32		3006
0/1,9	833	5,43	14,53		4522
2/3,9	561	4,86	14,74		2725
4/5,9	456	4,29	15,69		1954
6/7,9	456	3,71	16,64		1694
8/9,9	491	3,14	16,82		1543
	4815		26980	179	27159
Середній COP за опалювальний період			3,14		
Кількість спожитих енергоресурсів підібраним обладнанням, кВт			8606		

Таблиця 4

Розрахунок економічних показників де джерелом тепла є електроджерело

Джерело теплоти	Електроджерело
Кількість спожитих енергоресурсів, кВт	27159
Тариф, грн./кВт	4,32
Вартість експлуатації, грн./сезон	117 326 грн.

Таблиця 5

Розрахунок економічних показників тепловий насос та вбудований електронагрівач

Джерело теплоти	Тепловий насос типу спліт Mycond BeeHeat	ЕлектроТЕН	Сума
Кількість спожитих енергоресурсів, кВт	8606	179	
Тариф, грн./кВт	4,32	4,32	
Вартість експлуатації, грн./сезон	37 178 грн.	771 грн.	37 949 грн.

особливо повітряного типу, в умовах українського клімату. При сильних морозах (нижче -15°C) коефіцієнт перетворення енергії (COP) істотно знижується, і система може потребувати додаткового електронагріву, що зменшує загальну енергоефективність та підвищує витрати [49]. Це знижує привабливість теплових насосів у північних і східних регіонах країни, де холодні зими є нормою. Таким чином, для розвитку ринку теплових насосів в Україні необхідна комплексна державна

політика: впровадження фінансових стимулів, оновлення будівельних норм і підтримка навчання фахівців. Лише тоді ця технологія зможе стати реальною альтернативою традиційним джерелам тепла на великій території країни.

У найближчі десятиліття теплові насоси стануть ключовим елементом у декарбонізації систем опалення, особливо завдяки інтеграції з іншими передовими технологіями. Одним із перспективних напрямів є поєднання теплових

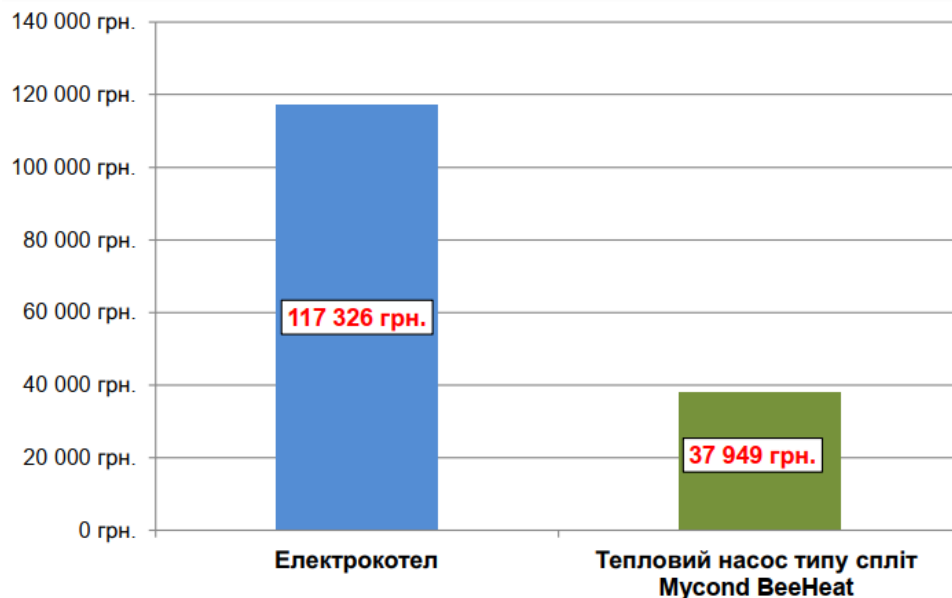


Рис. 4. Графік порівняння експлуатаційних витрат на систему опалення за опалювальний сезон

насосів із фотоелектричними системами (PV + HP), що дозволяє забезпечити автономність та майже повну незалежність від зовнішніх джерел енергії. Надлишкова електроенергія, вироблена сонячними панелями, може спрямовуватись на живлення теплового насоса, особливо в міжсезоння [52].

Інший важливий тренд – інтеграція теплових насосів у Smart Grid-мережі з використанням теплових акумуляторів. Завдяки розподілу навантажень у часі та зберігання тепла в спеціальних резервуарах, такі системи здатні підвищити стабільність енергопостачання та ефективно використовувати енергію в періоди низького тарифу [53].

Важливу роль у розвитку галузі відіграють інновації в холодоагентах. Нові типи безфреонових або природних холодоагентів, таких як R-290 (пропан) або CO₂ (R-744), є менш шкідливими для клімату та відповідають сучасним екологічним вимогам ЄС і Кіотського протоколу. Їх впровадження дозволяє знизити вплив на довкілля без втрати ефективності [54].

Крім того, зростає роль цифрових технологій, таких як AI (штучний інтелект) та IoT (інтернет речей), у керуванні тепловими насосами. Завдяки

інтелектуальним алгоритмам система може адаптувати свою роботу до погодних умов, режиму споживання енергії та тарифів, що дозволяє підвищити коефіцієнт перетворення енергії (COP) на 10–20% [55].

В ході проведеного порівняння затрат на опалення будинку тепловим насосом та електрокотлом, визначено економію коштів, на прикладі реального об'єкту – будинку в м. Київ площею 150 м². На основі отриманих даних, можна зробити висновки, що теплові насоси є одним із найбільш ефективних рішень для забезпечення опалення, охолодження та гарячого водопостачання в умовах сучасної енергетичної трансформації. З технічного погляду, вони забезпечують високий коефіцієнт корисної дії (COP), який у сучасних моделях сягає 3–5. З економічної точки зору, хоча початкові інвестиції залишаються досить високими, термін окупності за умови правильного монтажу та експлуатації становить 3–6 років, особливо при заміні електроопалення або газових систем. В екологічному аспекті теплові насоси не створюють локальних викидів парникових газів і сприяють зменшенню залежності від викопного палива, що є важливою складовою декарбонізації.

Список літератури:

1. Council Climate. Key Issues for the New Climate Agreement 2015. ClimateJournal. 2015. Vol. 9. P. 9.
2. UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Paris, 2015.
3. Bowen A., Rydge J. Climate change policy in the United Kingdom. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, 2011.

4. Review of the Market of Thermal Pumps. Electronic Magazine of Power Service Company «Cities and Buildings». 2013. No. 7. July.
5. Reay D. Industrial Heat Pumps. 2nd ed. Oxford: Pergamon, 2001.
6. International Energy Agency (IEA). The Future of Heat Pumps. 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
7. Connolly D., Mathiesen B.V., et al. Decarbonising Heat with Heat Pumps in Europe: Challenges and Innovations. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 173. 113010. DOI: 10.1016/j.rser.2022.113010
8. U.S. Department of Energy (DOE). Cold Climate Heat Pump Technology Challenges and Research Needs. 2021. URL: <https://www.energy.gov>
9. Kobayashi K., Yamaguchi S., Tanaka H. Smart Heat Pump Systems Using AI-Based Optimization in Japan. Energy and Buildings. 2022. Vol. 267. 112132.
10. Zhao X., Wu J., Zhang L. Heat Pump Flexibility for Demand-Side Management: A Systematic Review. Applied Energy. 2023. Vol. 342. 120993.
11. Staffell I., Brett D., Brandon N., et al. A review of domestic heat pumps. Energy Environ Sci. 2012. Vol. 5, No. 11. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/c2ee22653g>
12. Безродний М.К., Притула Н.О., Місюра Т.О. Аналіз ефективності теплонасосної схеми опалення з використанням теплоти атмосферного повітря і сонячної енергії. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. No. 4 (50). С. 47–57.
13. Kelly N., Cockroft J. Analysis of retrofit air source heat pump performance: Results from detailed simulations and comparison to field trial data. Energy Build. 2011. Vol. 43, No. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.018>
14. Zhang Y., Zhang G., Zhang A., et al. Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in China: An analysis and review. Energies. 2018. Vol. 11, No. 10. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en1102642>
15. Лавріщев О.О., Новосилецький Ю.Л., Дідківський М.М. Доцільність застосування теплових насосів «повітря – вода» в умовах помірного клімату. Global science: prospects and innovations (Liverpool, 25–27 April, 2024): proceedings of IX International scientific and practical conference. Liverpool: Cognum Publishing House, 2024. P. 128–133.
16. Євтушенко Е., Ляхно М. Використання теплових насосів для отримання тепла і холоду. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/stud_konferenzia/2014/23.pdf
17. Jiang Jiatong, et al. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. 112106.
18. Deng J., Wei Q., Liang M., et al. Test on energy performance of medium-depth geothermal heat pump systems (MD-GHPs). Energy Build. 2019. Vol. 184. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.006>
19. Omer A.M. Ground-source heat pump systems and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 10. P. 123–134.
20. Lund J.W. Ground source (geothermal) heat pumps. In: Lineau P.J., editor. Course on heating with geothermal energy: conventional and new schemes. World geothermal congress 2020 short courses. Kazuno, Tohoku District, Japan, 2020. P. 1–21.
21. Sanner B., Karytsas C., Mendrinis D., Rybach L. Current status of ground source heat pumps and underground thermal storage in Europe. Geothermics. 2013. Vol. 32. P. 579–588.
22. Hepbasli A., Akdemir O., Hancioglu E. Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system. Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 44. P. 527–548.
23. Liu Z., Xu W., Qian C., Chen X., Jin G. Investigation on the feasibility and performance of ground source heat pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China. Renewable Energy. 2015. Vol. 19. P. 76–89.
24. Yang W., Chen Y., Shi M., Spitler J.D. Numerical investigation on the underground thermal imbalance of ground-coupled heat pump operated in cooling dominated district. Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 58. P. 627–637.
25. Pandey N., Murugesan K., Thomas H.R. Optimization of ground heat exchangers for space heating and cooling applications using Taguchi method and utility concept. Applied Energy. 2017. Vol. 190. P. 421–438.
26. Безродний М.К., Ословський С.О. Термодинамічна ефективність роботи теплонасосної системи кондиціонування на базі вертикального ґрунтового теплообмінника. Енергетика і автоматика. 2023. № 3. DOI: [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(67\).2023.074](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(67).2023.074)
27. EHPA. European heat pump market and statistics. 2021. URL: http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards/
28. Le K.X., Huang M.J., Shah N.N., et al. Techno-economic assessment of cascade air-to-water heat pump retrofitted into residential buildings using experimentally validated simulations. Applied Energy. 2019. Vol. 250. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.041>

29. Офіційний сайт виробника. URL: <https://mycond.ua/teplovi-nasosy-seriyi-beeheat>
30. Peksel A., Arıcı M., Karabay H. A review on alternative refrigerants in heat pump systems: Environmental and thermodynamic comparison. *International Journal of Refrigeration*. 2021. Vol. 125. P. 33–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.025>
31. Lorentzen G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant. *International Journal of Refrigeration*. 1994. Vol. 17, No. 5. P. 292–301.
32. Aprea C., Greco A., Maiorino A. An overview on the use of CO₂ as refrigerant in heat pump systems. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 5781–5795.
33. Dossat R., Horan T. *Principles of Refrigeration*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 560 p.
34. COM. Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. 2009.
35. Gleeson C.P., Lowe R. Meta-analysis of European heat pump field trial efficiencies. *Energy Build.* 2013. Vol. 66. P. 637–647. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.064>
36. Madonna F., Bazzocchi F. Annual performances of reversible air-to-water heat pumps in small residential buildings. *Energy Build.* 2013. Vol. 65. P. 299–309. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.016>
37. Alberini A., Gans W., Towe C. Free riding, upsizing, and energy efficiency incentives in Maryland homes. *Energy J.* 2016. Vol. 37, No. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.5547/01956574.37.1.aalb>
38. Caird S., Roy R., Potter S. Domestic heat pumps in Ukraine: user behaviour, satisfaction and performance. *Energy Effic.* 2012. Vol. 5, No. 3.
39. Guo S., Yan D., Hu S. Global comparison of building energy use data within the context of climate change. *Energy Build.* 2020. Vol. 226. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110362>
40. Reports at the 9th IEA Heat Pump Conference. Zurich, 2008. P. 54–111.
41. Reports at the 8th IEA Heat Pump Conference. Las Vegas, 2005. P. 67–95.
42. Reports at the 10th IEA Heat Pump Conference. Tokyo, 2011. P. 44–78.
43. Степаненко В.А. Яким буде теплопостачання України у XXI столітті. С. 114–120.
44. Мацевитий Ю.М., Чіркін М.Б., Остапчук В.М. Альтернативна система теплопостачання на основі теплового насоса з ґрунтовим теплообмінником. *Енергозбереження, енергетика, енергоаудит*. 2007. № 8. С. 111–154.
45. Держенергоефективності. Розвиток відновлюваної енергетики в Україні – 2023. URL: <https://saee.gov.ua/>
46. Теплові насоси: огляд ринку України. *Energy Evolution*, 2022.
47. Білявський Г.О., Яковенко Р.С. *Енергозбереження та альтернативна енергетика*. Київ: Ліра-К, 2020. 256 с.
48. Пашенко О.В. *Інноваційні технології в опаленні будівель*. Львів: Видавництво ЛНУ, 2021. 150 с.
49. European Heat Pump Association. *Heat Pump Outlook in Central and Eastern Europe*. 2022. URL: <https://www.ehpa.org>
50. Суходуб І.О., Шкляр В.І., Дубровська В.В. Аналіз фактичних, типових та нормативних кліматичних даних в контексті енергетичного моделювання будівель. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 2. С. 35–43. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2022.261367.
51. Держенергоефективності. Рекомендації щодо впровадження теплових насосів в системах теплопостачання. URL: <https://saee.gov.ua>
52. International Energy Agency (IEA). *The Future of Heat Pumps*. Paris: IEA, 2022. URL: <https://www.iea.org>
53. European Heat Pump Association. *Smart Heat Pumping Solutions for a Low-Carbon Future*. 2023. URL: <https://www.ehpa.org>
54. Dincer I., Rosen M.A. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Wiley, 2021. 576 p.
55. Zhang L., et al. *Artificial Intelligence in Heat Pump Systems: A Review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022.

Tkachenko M.V., Ryndiuk D.V. FEATURES OF HEATING AND AIR CONDITIONING SYSTEMS BASED ON HEAT PUMPS

The article addresses the issue of reducing energy consumption and greenhouse gas emissions in the residential sector, which requires the implementation of highly efficient and environmentally safe heating technologies.

Given the significant rise in the cost of traditional energy sources and the relevance of decarbonizing heating systems, the use of heat pumps is seen as a promising direction for modernizing the energy infrastructure. This issue is particularly important in the context of climate adaptation and improving the energy efficiency of the building stock.

The advantages of heat pumps are highlighted, including a high coefficient of performance (COP), zero harmful emissions, application flexibility, and long service life. At the same time, certain limitations are identified: high initial cost, reduced efficiency at low temperatures, the need for qualified maintenance, and the lack of government support in Ukraine.

Special attention is paid to environmental aspects, particularly the transition to safer refrigerants with low global warming potential.

The aim of the study is to assess the techno-economic efficiency of using an air-source heat pump for heating a private house in Ukraine's temperate climate and to compare its operational characteristics with those of an electric boiler.

The study employs methods of thermal engineering calculation, energy consumption analysis, seasonal outdoor temperature dynamics, and techno-economic comparison of heating systems based on energy use, efficiency ratio, and operating costs.

The technical specifications of the Mycond BeeHeat air-to-water heat pump with a nominal thermal capacity of 16.2 kW are analyzed, along with the results of its practical application in a 150 m² house. Based on the hourly distribution of outdoor temperatures in the Kyiv region, the required heat load during the heating season is determined.

It is established that the average seasonal coefficient of performance of the heat pump is 3.14, and the total energy consumption of the system, including peak load, amounts to 8,785 kWh.

In comparison with an electric boiler consuming 27,159 kWh over the same period, the cost savings exceed 79,000 UAH per season. A graph of heat loss coverage depending on temperature is constructed, and the system's bivalence point is identified. The stable operation of the equipment is confirmed under temperatures down to -22 °C.

The practical value of this work lies in demonstrating the real potential of implementing heat pumps in Ukraine's private sector as an alternative to electric heating. The results can be used for preliminary techno-economic justification of equipment selection, investment planning in thermal modernization, and optimization of building energy consumption.

Key words: *heat pump, heating system, energy efficiency, air heat source, coefficient of performance, energy consumption, techno-economic assessment, alternative heating, thermal modernization.*

Дата надходження статті: 22.07.2025

Дата прийняття статті: 28.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Усов І.Л.

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

Шелешей Т.В.

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

ПРОЦЕСИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО СТУПЕНЕВОГО ЗГОРЯННЯ У КОНТЕКСТІ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ НА ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

В межах цієї роботи увага зосереджувалася на різних імплементаціях концепції низькотемпературного ступеневого згоряння задля зменшення виділення оксидів азоту (NO_x) на теплоелектростанціях. У дослідженні зроблено узагальнений аналіз механізмів утворення NO_x у системах згоряння та обґрунтовано ефективність низькотемпературного згоряння як засобу зменшення їх емісії. Проаналізовано ключові шляхи утворення NO_x : термічний, паливний і проміжний, із зазначенням умов їх домінування. Описано вплив пікової температури полум'я, локального стехіометричного співвідношення та характеру зонування полум'я на інтенсивність утворення NO_x . Обґрунтовано термодинамічні й кінетичні передумови для застосування стратегій зниження емісій, зокрема ступеневого згоряння, рециркуляції димових газів (EGR), водяного впорскування та зменшення попереднього нагріву повітря. Визначено, що найефективнішим є підхід LTC, який передбачає контроль пікової температури згоряння. Розглянуто варіанти реалізації LTC: HCCI, PCCI та RCCI, із вказівкою на їхній вплив на структуру полум'я та концентрацію шкідливих речовин. Доведено, що в умовах кінетичних обмежень термічне утворення NO_x не досягає рівноважних значень, і тому для точного прогнозування емісії необхідне врахування динаміки реакцій. Проаналізовано застосування селективного каталітичного відновлення (SCR) як посткомбустійної технології контролю NO_x , з урахуванням особливостей температурного діапазону, типів каталізаторів та їхньої деградації. Досліджено можливість використання CFD-моделювання (зокрема моделей RANS та k-ε) для відтворення температурних полів, зон згоряння та розподілу концентрацій реагентів, що дозволяє кількісно оцінити утворення NO_x на основі локальних умов. Показано, що взаємодія турбулентності з хімічною кінетикою вимагає застосування спрощених механізмів реакцій або моделей з редукованою кількістю ступенів свободи для забезпечення обчислювальної ефективності. Зроблено висновок про доцільність комплексного підходу, що поєднує конструктивні, термодинамічні та каталізаторні рішення, з динамічним перемиканням режимів згоряння для адаптації до змінних умов експлуатації.

Ключові слова: CFD моделювання, отруєння каталізатору, адіабатична температура полум'я, топкова камера, фрізаут, рециркуляція димових газів.

Постановка проблеми. Проблематика впливу технологій енергетичного виробництва на довкілля в умовах зростаючої потреби у тепловій енергії набуває особливої актуальності. Сучасна енергетика стикається з комплексом викликів, які охоплюють не лише необхідність підвищення ефективності перетворення хімічної енергії палива на корисну теплову енергію, а й обов'язкову вимогу дотримання жорстких екологічних стандартів щодо викидів забруднювальних речовин.

Зокрема, особливу увагу дослідників і розробників привертає проблема зменшення обсягів оксидів азоту (NO_x), що утворюються під час високотемпературного горіння палива в енергетичних установках, оскільки ці сполуки є одними з основних джерел утворення смогу, кислотних дощів і вторинних аерозолів.

Традиційні методи скорочення викидів NO_x , наприклад застосування селективного каталітичного відновлення (SCR) або селективного нека-

талітичного відновлення (SNCR), передбачають використання додаткових реагентів, складного обладнання й суттєвих капіталовкладень. Тому пошук внутрішньотопкових рішень, спрямованих на запобігання утворенню оксидів азоту ще на стадії згоряння палива, стає пріоритетним напрямом розвитку сучасних теплогенераційних технологій. Одним із перспективних підходів є реалізація режимів низькотемпературного ступеневого згоряння, що базуються на багатоетапному підведенні палива й окиснювача з контрольованим розподілом температурного поля та кисню у топковому об'ємі.

Однак ефективна реалізація таких режимів потребує глибокого науково-технічного обґрунтування щодо впливу різних параметрів горіння (температури, швидкості потоків, концентрації реагентів, конфігурації пальників тощо) на кінетику утворення NO_x . У цьому контексті важливим завданням є пошук технічно та економічно доцільних рішень, здатних забезпечити сталий баланс між продуктивністю теплогенераційних систем і дотриманням екологічних нормативів, зокрема у сфері теплових електростанцій, які залишаються основою енергозабезпечення в багатьох країнах. Таким чином, дослідження процесів низькотемпературного ступеневого згоряння розглядається як ключовий напрям оптимізації теплотехнічних установок у контексті забезпечення екологічної безпеки та енергетичної ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методологічне підґрунтя сучасних підходів до мінімізації емісій оксидів азоту (NO_x) у процесах низькотемпературного ступеневого згоряння сформовано у низці останніх теоретичних і прикладних досліджень.

У праці С. Янта-Ліпінської запропоновано комплексну теоретико-експериментальну концепцію дозованого спрямованого впорскування вологи – *directed metered flame ballasting* – у критичні зони полум'я (SDW-I та SDW-II) [1]. Послідовне зволоження локальних осередків горіння, реалізоване за рахунок зонального поділу факела, пригнічує як термічний, так і проміжний механізми утворення NO_x . Експерименти, виконані на чотирьох парових котлах потужністю від 8,37 до 53,78 МВт у реальних виробничих умовах, засвідчили зниження масової емісії NO_x у середньому на 30–40% без погіршення ефективності спалювання; питомі витрати пари на впорскування не перевищували 1% від паропроductивності, а приріст теплової ефективності котлів повністю компенсував додаткові витрати пари.

Дисертаційне дослідження Р. Бірлі спрямоване на зменшення NO_x -емісії на теплових електростанціях, що працюють на пиловугільному паливі, шляхом сумісного спалювання вугілля з продуктами згоряння біомаси – золовиною електрофільтрів (PFA) та шлаком з дна топки (FBA) [2]. Гіпотеза про каталізаторну роль елементів K, Ca, Na та Mg у таких сумішах була перевірена на трьох типових бітумінозних вугіллях, одному низькорективному вугіллі та біомасі з високою реактивністю. Додавання PFA або FBA спричинило зростання частки леткого азоту та зменшення частки азоту, зв'язаного у чарі, що, у свою чергу, сприяло підвищенню ступеня перетворення вуглецю незалежно від швидкості нагріву. Для верифікації результатів у промисловому масштабі застосовано тривимірну *slice-model*, яка поділяє топку на об'ємні зрізи; похибка прогнозу викидів NO_x не перевищила $\pm 10\%$ від експериментально вимірених значень.

Дж. Сільвагні зі співавторами розробили конфігурацію *reactivity-controlled compression ignition (RCCI)* дизель – природний газ у контексті низькотемпературного згоряння (LTC) та її впливу на викиди NO_x і незгорілих вуглеводнів (HC) [3]. У однокамерному дизельному двигуні великої потужності природний газ (низькорективне паливо, LRF) подавали разом із повітрям, а дизельне паливо (високореактивне паливо, HRF) впорскували під високим тиском. Використання високочастотних вимірювальних систем *Fast-FID* і *Fast-NO_x* (500 Гц) дозволило встановити статистично значущі кореляції між циклічною варіацією середнього індикаторного тиску (IMEP) і миттєвими викидами HC ($R^2 = 0,86$), а також між піковою швидкістю виділення теплоти (RoHR) та миттєвими викидами NO_x ($R^2 = 0,82$). Ранні кути початку впорскування ($\text{SOI} = -60^\circ$ до BMT) забезпечують гаус-подібний профіль згоряння з поліпшеним змішуванням і нижчими NO_x -викидами, проте характеризуються значними циклічними варіаціями та підвищеними HC; натомість пізні SOI (-10° до BMT) формують двоступеневий режим горіння з локальними зонами високої температури, що інтенсифікує утворення NO_x .

Теоретичне дослідження С. Губбі з колегами присвячене визначенню досяжного мінімуму NO_x при спалюванні аміаку в багатоступеневих камерах згоряння [4]. Використовуючи мережу реакторів (*chemical reaction network, CRN*) для моделювання конфігурації *rich-quench-lean (RQL)*, автори ідентифікували комбінації тиску, температури, еквівалентного коефіцієнта (Φ) та часу перебу-

вання, що забезпечують мінімальні концентрації NO_x . За тиску 1 бар мінімальний рівень становить 195–400 ppm, тоді як за 20 бар він може знижуватися до ≈ 25 ppm (≈ 23 ng / J). Ключовим чинником залишаються нерівноважні процеси утворення NO у багатому полум'ї першої стадії, які не встигають досягти рівноваги через обмежений час перебування; оптимізація передбачає одночасне зменшення вихідної концентрації NO та обмеження вмісту H_2 (не більше 125% від рівноважного значення).

Отже, не дивлячись на суттєвий прогрес, продемонстрований у зазначених роботах, питання комплексного використання процесів низькотемпературного ступеневого згоряння для систематичного зниження NO_x -емісії на теплових електростанціях залишаються недостатньо розробленими та потребують подальших високоточних експериментальних і числових досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є огляд моделі низькотемпературного ступеневого згоряння у контексті зменшення викидів оксидів азоту на теплових електростанціях на базі РССІ у поєднанні із посткомбустійним методом у вигляді селективного каталітичного відновлення.

Виклад основного матеріалу. Формування оксидів азоту (NO_x) у системах згоряння обумовлюється, як правило, двома механізмами:

- термічні NO_x формуються при реагуванні азоту з повітрям для горіння при температурах вище 1300 °С. Цей процес, описаний в межах механізму Зельдовича, будучи сильно залежним від пікової температури полум'я, є вираженням під час згоряння природного газу та стрімко зростає зі збільшенням температури, набуваючи домінуючого характеру за умов мінімального вмісту паливного азоту;

- паливні NO_x є продуктами хімічного сполучення азоту з паливом (тобто вугіллям, нафтою, біопаливом тощо). При згорянні виникають азотовмісні сполуки, тобто, наприклад, синильна кислота та аміак, які окиснюються до різних оксидів азоту в залежності від концентрації кисню. У процесі згоряння твердого палива ці оксиди становлять основну частку загальних викидів NO_x (до приблизно 75%) і є більш чутливими до локального стехіометричного співвідношення, ніж до температури. Проміжні NO_x мають подібний механізм утворення, швидко синтезуючись у зонах з великим вмістом палива, становлячи до 5% загальних викидів.

Низькотемпературне згоряння (low-temperature combustion – LTC) спрямоване на зниження піко-

вої температури полум'я головним чином для пригнічення утворення термальних NO_x , утворення яких експоненційно зростає з підвищенням температури [5]:

$$SNO_{\text{термальний}} \propto [N_2][O_2]^{1/2} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

де E – енергія активації, R – газова стала.

Для реалізації такого горіння застосовується низка стратегій. Ступеневе згоряння полягає у постадійній подачі повітря, що обумовлює початок горіння за умов достатньої кількості палива та дефіциту повітря. Такий підхід розподіляє виділення тепла та запобігає локальним стрибкам температури. Інша методика полягає у рециркуляції димових газів (exhaust gas recirculation – EGR), в ході чого відбувається повторна подача вихлопних газів у зону згоряння, що таким чином сприяє поглинанню тепла та зниженню концентрації кисню. З метою організації рециркуляції, димові гази, як правило, після економайзера відбираються за температури 300–400 °С рециркуляційними димососами та подаються у топку. Характер рециркуляції сильно залежить від способу введення газів в топку, до яких входить введення через шліци під горілками, через кільцевий канал навколо горілок, або змішування цих газів із повітрям перед горілками, що вдувається. Найефективнішим виявляється змішування газів, оскільки температура у ядрі факела знижується найбільше [6]. Так, цей засіб здатний сприяти зниженню азоту на 40–30%, якщо частка впроваджених димових газів складає 20–25%.

Впорскування води також виявляється ефективним, оскільки рідини здатні поглинати тепло при випаровуванні. Зменшення попереднього нагріву, попри меншої ефективності, також робить свій внесок, адже зниження температури повітря для горіння, що надходить, хоча і незначно, але знижує початкову температуру полум'я.

У будь-якому випадку, мета полягає у створенні широкої зони менш гарячого полум'я задля запобігання локальних високотемпературних зон, в яких можуть формуватися термальні оксиди азоту. Ступеневе згоряння, будучи найбільш релевантним для теми поточного дослідження, має 2 фундаментальних різновиди [7]. Повітряне, або двоступеневе згоряння полягає у подачі лише частини необхідного повітря для горіння (близько 70–90%) разом з паливом до пальників (первинний ступінь). У цій первинній зоні згоряння утворюється обмежена кількість NO_x , які в ній також можуть поглинатися. Залишкове повітря потім

подається над первинним полум'ям через повітря отвори для перепалу задля завершення процесу згоряння у зоні з меншою температурою (вторинний ступінь).

В ході паливного ступеневого згоряння більшість повітря подається до головної топки, а додаткове паливо впорскується потім. Фактично, після первинного ступеня, вторинний передбачає створення умов більшої кількості палива, що сприяє поглинанню оксидів азоту шляхом їхнього відновлення у процесі реакції з вуглеводневими радикалами [8]. В межах третього ступеня повітря подається для остаточного згоряння залишкового палива. Критичний аспект цього виду ступеневого згоряння полягає у необхідності контролю того, щоб не утворювалися кисневі кишені та не перешкождали процесу відновлення оксидів азоту.

З точки зору термодинаміки, адіабатична температура згоряння залежить від значення нагрівання полум'я та початкових умов суміші (включно із коефіцієнтом надлишку повітря). В умовах ідеального стехіометричного згоряння типового вуглеводню за відсутності втрат тепла, адіабатична температура згоряння може перевищувати 2000 °C. Однак введення надлишкового повітря знижує цю температуру шляхом поглинання енергії нагріванням надлишкової маси газу. Наприклад, враховуючи 10% надлишкового повітря, температура полум'я може впасти на декілька сотень градусів. Таким чином, сама по собі наявність збідненої суміші призводить до нижчої рівноважної температури полум'я, що є термодинамічним обґрунтуванням низькотемпературного горіння. Проте, термодинаміка рівноваги сама по собі не є достатньо ефективною у задачах визначення викидів оксидів азоту, оскільки їхній синтез є майже завжди кінетично обмеженим, а не знаходиться в стані рівноваги. За типових температур полум'я рівноважна концентрація NO_x може бути порядку декількох тисяч ppm (мільйонних часток). Це є явищем «фрізауту» (freeze-out) оксиду азоту, тобто коли гази покидають зону полум'я та подальшим зниженням температури, реакції, які б перетворили NO_x до N_2 та навпаки, уповільнюються, фактично залишаючи оксиди азоту в незмінній формі. З огляду на це, модель, заснована суто на концепції рівноваги, має тенденцію завищувати прогноз NO_x , припускаючи кількості, близькі до рівноважних, при високих температурах, тоді як фактичний NO_x визначається взаємодією температури та скінченного часу реакції [9].

В той час як LTC за своєю суттю являє собою групу методик пригнічення синтезу NO_x , підходи

регуляції їхньої кількості також може зосереджуватися на зниженні NO_x , вже після згоряння. Ці підходи охоплюють принцип селективного каталітичного відновлення (Selective Catalytic Reduction – SCR) в ході якого застосовуються каталізатори на основі оксидів металів задля його проведення за відносно низьких температур з підвищеною ефективністю. SCR передбачає введення азотовмісного відновника, зазвичай NH_3 у димовий газ на виході топки та економайзера. В присутності каталізатора та кисню, NH_3 селективно вступає в реакцію з NO та NO_2 з продуктами у вигляді молекулярного азоту та водяної пари [10].

У зв'язку із переважанням NO у димових газових викидах, його каталітичне відновлення є домінуючим у більшості індустріальних застосувань цього процесу. Сам процес є кінетично сприятливим у температурному діапазоні реакції 250–430 °C, дозволяючи ефективно позбавлення оксидів азоту без негативних ефектів, які виникають в умовах високої температури.

В якості каталізаторів найчастіше застосовуються оксиди ванадію, титану, вольфраму ($\text{V}_2\text{O}_5\text{--TiO}_2\text{--WO}_3$) та цеоліти, які виготовляються у вигляді стільникових або гофрованих структур задля максимізації співвідношення площі поверхні до об'єму. З точки зору способів каталітичного відновлення, типово застосовуються три конфігурації:

- High-dust (високопиловий): встановлюється перед пиловловлювачами; піддається дії високого вмісту золи, тому оснащується обдувачами сажі;
- Low-dust (низькопиловий): розміщується після електрофільтрів, що забезпечує триваліший термін служби каталізатора та нижчу інтенсивність забруднення;
- Tail-end (кінцева стадія): встановлюється після всіх етапів очищення димових газів; потребує повторного нагрівання газу, але має перевагу у вигляді мінімальної деградації каталізатора.

З точки зору термодинаміки, SCR підхід вирішує проблему фрізауту, оскільки ефективність видалення NO_x менш залежна від швидкого зниження температури. Крім того, повторне нагрівання димових газів за допомогою обводу економайзера або пальників у газоході забезпечує підтримання робочих умов реактора навіть за часткового навантаження котла.

З іншого боку, економічно застосування SCR систем пов'язане з вищими капітальними та експлуатаційними витратами, а-ніж звичайні методи контролю кількості, особливо з причини необ-

хідності великих об'ємів каталізаторів та витрат інших реагентів. До того ж, каталізатори за своєю суттю є речовинами, чутливими до спікання, отруєння та забруднення золою. Таким чином, найбільш належна стратегія має передбачати як каталізаторні, так і традиційні підходи.

Обчислювальна гідродинаміка (Computational Fluid Dynamics – CFD) є інструментом, призначеним для детального моделювання процесів ступеневого згоряння із урахуванням геометрії реальних топків [11]. Симуляції RANS стаціонарного стану (Reynolds-averaged Navier-Stokes – рівняння Нав'є Стокса (рівняння руху в'язкої рідини), усереднені за Рейнольдсом) із моделями турбулентності (як наприклад k-ε) та згоряння (хімія зі скінченною швидкістю, вихрова дисипація (eddy dissipation concept) або гібридні моделі) можуть застосовуватися для моделювання тенденцій NO_x спочатку за допомогою обчислення полів потоку, температури та концентрації основних речовин, таких як O₂, CO₂, CO. Потім для NO_x застосовується постпроцесор та розв'язується транспортне рівняння, де джерелові терміни залежать від місцевих умов: температури та рівня O₂:

$$\nabla \cdot (\Gamma_i \nabla Y_i) + \omega_i \quad (2)$$

ω_i – масова частка, Γ_i – ефективний коефіцієнт дифузії, який включає молекулярну та турбулентну дифузію.

Враховуючи, що формування оксидів азоту в системах згоряння тісно пов'язане із температурою полум'я, розподілом повітря з паливом та зонуванням топків, існує практична потреба у вдосконалених технологіях контролю. Фундаментальний принцип концепції низькотемпературного згоряння, описаного у поточному дослідженні, полягає у подовженні часу змішування палива з повітрям та підтриманні температури згоряння нижче необхідної для формування NO_x, що досягається за допомогою EGR та ступеневого згоряння.

Запалення однорідної горючої суміші від стискання (homogeneous charge compression ignition – HCCI), що є головним різновидом LTC, полягає у однорідному змішуванні палива з повітрям до запалювання, що передбачає раннє введення палива у топку, забезпечуючи достатній час для утворення однорідної суміші. У кінцевому випадку, процес згоряння обумовлюється хімічною кінетикою, оскільки відбувається одночасне запалювання на кількох ділянках топки. В контексті теплових електростанцій, такий тип згоряння може бути досягнутий за допомогою пальників

з низькими викидами NO_x (Low-NO_x Burners). Проте за використання HCCI, можуть виникати високі показники тепловиділення.

У цьому відношенні, запалення попередньо перемішаної суміші від стискання (premixed charge compression ignition – PCCI) є більш адаптивним у зв'язку зі своєю сумісністю з системи прямої ін'єкції. Такий тип запалення може бути реалізований шляхом введення палива на декількох стадіях з метою створення збідненої попередньої змішаної суміші, запобігаючи виникненню зон із найвищою концентрацією палива. Транспортне рівняння для NO_x у PCCI відрізняється тим, що вихідний терм ω_{NO} залежить вже від кількох подій введення палива:

$$\omega_{NO} = k_{NO} [N_2] [O_2]^{0.5} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

де k_{NO} є константою ефективної швидкості, яка враховує вплив турбулентних потоків на хімічні реакції, яка зазвичай моделюється за EDC:

$$\omega_{NO} = \min(\omega_{kin}, \omega_{турб}), \omega_{турб} = C_{EDC} \cdot \rho \cdot \frac{k}{\min(Y_{паливо}^s, Y_{O_2}^{1+s})} \quad (4)$$

де ε є швидкістю турбулентної дисипації, k – турбулентною кінетичною енергією, $Y_{паливо}$ та Y_{O_2} є масовими частками палива та кисню.

Стратегія запалення шляхом контролю реактивності (reactivity controlled compression ignition – RCCI) передбачає застосування низькорективного палива, яке вводиться першим з метою утворення однорідної суміші, та супроводжується введенням високореактивного палива безпосередньо для контролю запалення. Градієнт реактивності, який визначається за допомогою просторового розподілу реактивності палива ($\lambda = \frac{\text{цетанове число}_{\text{низька реактивність}}}{\text{цетанове число}_{\text{висока реактивність}}}$), визначає фазу та тривалість горіння.

На рис. 1 зображено взаємозв'язок між еквівалентним співвідношенням паливо-повітря (Φ) та температурою згоряння (T) для різних режимів згоряння з точки зору викидів шкідливих речовин. Режими HCCI, PCCI та RCCI займають значно вигідніші ділянки діаграми на відміну від згоряння звичайного палива [12].

Незважаючи на ефективність таких методів, існує потреба у стратегії перемикавання режиму. Така стратегія передбачає підлаштування робочих параметрів: часові налаштування введення палива θ_{SOI} , кількість палива $m_{паливо}$, швидкість потоку повітря $\dot{m}_{паливо}$, та швидкість EGR. Динаміка переходу моделюється за допомогою контрольного рівняння для умов в топці:

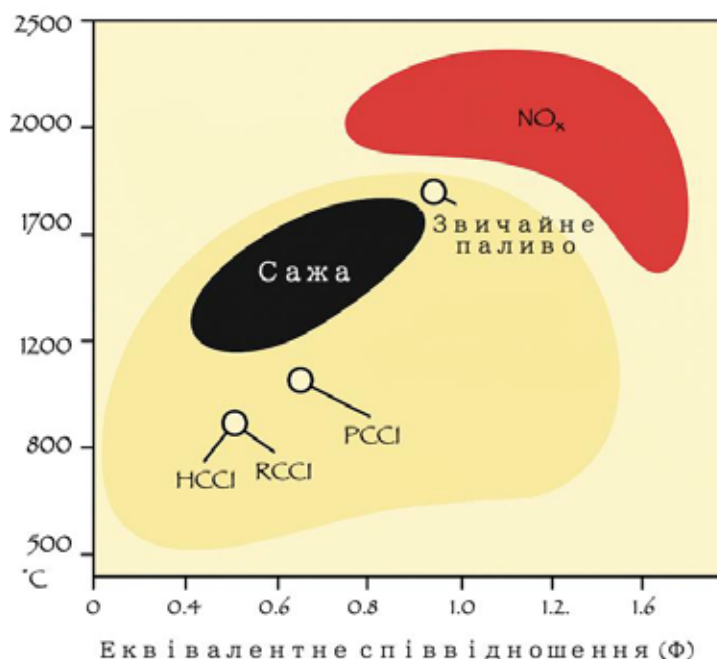


Рис. 1. Ф-Т діаграма різних моделей згоряння з урахуванням рівнів виділення сажі та оксидів азоту

$$\frac{dP}{dt} = (\gamma - 1) \frac{1}{V} (HRR - \dot{Q}_{\text{втрата}}) + \gamma \frac{P}{V} \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

де HRR – швидкість виділення тепла (heat release rate), γ – показник адиабати, V – об'єм топки, $\dot{Q}_{\text{втрата}}$ – швидкість тепловтрат.

Оскільки за умов застосування РССІ паливо вводиться протягом декількох стадій до запалення, що забезпечує його рівномірний перебіг під час стискання, формування термальних NO_x є низьким, проте ще достатньо високим, щоби мати сенс у застосуванні SCR для їх доведення до нормативних меж. До того ж, температура вихлопу в РССІ зазвичай достатня для ефективної роботи SCR.

Висновки. Визначено, що підхід LTC є найбільш перспективним з огляду на здатність керу-

вати температурним режимом з високою точністю. Розглянуті варіанти реалізації LTC (HCCI, PCCI, RCCI) демонструють потенціал до істотного скорочення утворення шкідливих сполук за рахунок зміни структури полум'я та умов перебігу реакцій. Також підтверджено доцільність використання CFD-моделювання як інструменту кількісної оцінки утворення NO_x у реальних умовах, що дозволяє враховувати локальні термодинамічні й кінетичні особливості. Паралельно розглянуто посткомбустійні технології, зокрема селективне каталітичне відновлення (SCR), що дозволяє ефективно видаляти залишкові оксиди азоту у вихлопних газах. Обґрунтовано доцільність поєднання методів первинного та вторинного контролю з урахуванням теплових режимів, деградації каталізаторів і динаміки зміни навантаження котлів.

Список літератури:

1. Janta-Lipińska S. The method of nitrogen oxide emission reduction during the combustion of gaseous fuel in municipal thermal power boilers. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2020. Vol. 3. No. 2. DOI:10.53412/jntes-2020-3.2
2. Birley R. I. Additives for the reduction of NO_x emissions in large scale solid fuel combustion : doctoral thesis / University of Leeds, Centre for Doctoral Training in Bioenergy, School of Chemical and Process Engineering. Leeds, June 2020. 292 p. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/27395/1/Thesis%20RI%20Birley%20UoL%2030%20June%202020.pdf> (last accessed: 17.06.2025).
3. Experimental characterization of hydrocarbons and nitrogen oxides production in a heavy-duty diesel–natural gas reactivity-controlled compression ignition engine / Silvagni G., Narayanan A., Ravaglioli V., Srinivasan K. K., Krishnan S. R., Collins N., Puzinauskas P., Ponti F. *Energies*. 2023. Vol. 16. 5164. DOI:10.3390/en16135164
4. Evaluation of minimum NO_x emission from ammonia combustion / Gubbi S., Cole R., Emerson B., Noble D., Steele R., Sun W., Lieuwen T. *Proceedings of the 1st IGTC – Dispatchable Technology & Innovations for a Carbon-Neutral Society (10–11 October 2023, Brussels, Belgium)*, 2023. Paper I. D.: 2-IGTC23.

5. Singh A., Agarwal A. Low temperature combustion engines and mode switching strategies – A review. *Journal of Energy and Environmental Sustainability*. 2018. Vol. 6. P. 42–47. DOI:10.47469/JEES.2018.v06.100066
6. An experimental analysis of high-pressure exhaust gas recirculation system in SI engine / Anil, Ankur, Kumar A., Singh G., Singh A., Kaushik N. *Industrial Engineering Journal*. 2025. Vol. 54. Iss. 4. No. 2. P. 47–52.
7. Reducing NO_x emissions from ammonia combustion through staged combustion / Nasim M., Landis J., Das S., Nawaz B., Mack J. *Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 2024. DOI:10.1115/ICEF2024-140772
8. Smith D. J. Coal reburning reduces NO_x emissions. *Power Engineering* : website. 2000. URL: <https://surli.cc/eoedij> (last accessed: 17.06.2025).
9. Stark M. S., Harrison J. T. H., Anastasi C. Formation of nitrogen oxides by electrical discharges and implications for atmospheric lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1996. Vol. 101. No. D3. P. 6963–6969. DOI:10.1029/95JD03008
10. Chen Y.-J., Tan P., Yao C., Lou D. Effect of catalyst coating strategy on NO_x reduction and passive soot oxidation for selective catalytic oxidation-selective catalytic reduction catalyst on diesel particulate filter. *WCX SAE World Congress Experience*. April 2025. DOI: 10.4271/2025-01-8490
11. Le D. K., Lee M., Kwon H. Optimization of a hydrogen burner to minimize NO_x emissions using computational fluid dynamics and response surface methodology. *Fuel*. 2025. Vol. 401. 135818. DOI:10.1016/j.fuel.2025.135818
12. Gadalla M. Computational fluid dynamics studies on spray assisted combustion of alternative energy carriers : thesis for the PhD degree / advisor Vuorinen V. April 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.16927.74406

Usov I.L., Sheleshei T.V. LOW-TEMPERATURE STAGED COMBUSTION PROCESSES IN THE CONTEXT OF REDUCING NO_x EMISSIONS AT THERMAL POWER PLANTS

*Within the framework of this work, attention was focused on various implementations of the concept of low-temperature staged combustion in order to reduce nitrogen oxides (NO_x) emissions at thermal power plants. The study provides a generalized analysis of the mechanisms of NO_x formation in combustion systems and substantiates the effectiveness of low-temperature combustion as a means of reducing their emissions. The key pathways of NO_x formation are analyzed: thermal, fuel, and intermediate, with indication of the conditions under which they dominate. The influence of peak flame temperature, local stoichiometric ratio, and the character of flame zoning on the intensity of NO_x formation is described. The thermodynamic and kinetic prerequisites for the application of emission reduction strategies are substantiated, in particular staged combustion, exhaust gas recirculation (EGR), water injection, and reduction of intake air preheating. It is determined that the most effective approach is LTC, which involves control of the peak combustion temperature. Variants of LTC implementation are considered: HCCI, PCCI, and RCCI, with indication of their influence on flame structure and concentration of harmful substances. It is proven that under kinetic limitations, thermal formation of NO_x does not reach equilibrium values, and therefore accounting for the dynamics of reactions is necessary for accurate emission prediction. The application of selective catalytic reduction (SCR) as a post-combustion technology for NO_x control is analyzed, taking into account the specifics of the temperature range, types of catalysts, and their degradation. The possibility of using CFD modeling (in particular RANS and *k-ε* models) to reproduce temperature fields, combustion zones, and distribution of reagent concentrations is studied, which makes it possible to quantitatively evaluate NO_x formation based on local conditions. It is shown that the interaction of turbulence with chemical kinetics requires the use of simplified reaction mechanisms or models with a reduced number of degrees of freedom to ensure computational efficiency. A conclusion is made about the expediency of a comprehensive approach that combines constructive, thermodynamic, and catalytic solutions, with dynamic switching of combustion modes to adapt to changing operating conditions.*

Key words: CFD modeling, catalyst poisoning, adiabatic flame temperature, furnace chamber, freeze-out, exhaust gas recirculation.

Дата надходження статті: 17.06.2025

Дата прийняття статті: 27.06.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Харитонов Ю.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Поберій М.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ МІСЬКИХ АГЛОМЕРАЦІЙ

Дана стаття присвячена пошуку актуальних інноваційних технологій для оптимізації систем теплопостачання в умовах міських агломерацій, оскільки їх стрімке зростання потребує необхідності у вдосконаленні систем теплопостачання, які є ключовими елементами енергоефективності міської інфраструктури. Визначено, що інноваційні технології, такі як інтеграція відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), використання сучасних теплоаккумуляторів, автоматизовані системи управління та моніторингу дозволяють оптимізувати роботу теплових мереж. Перш за все доведено, що впровадження відновлювальних джерел енергії, таких як сонячні колектори і теплові насоси, знижує залежність від традиційних видів пального, сприяючи розширенню «зеленого» портфеля енергії.

В статті розглянуто яким чином модернізація існуючих теплоаккумуляторів та систем теплоносії з використанням інноваційних матеріалів забезпечує підвищення енергоефективності та скорочення теплових втрат. З'ясовано, що впровадження нових автоматизованих систем управління дозволяє не лише оптимізувати споживання енергії, а також значно покращує надійність і гнучкість системи в умовах коливань попиту на тепло.

Також з'ясовано, що Важливим аспектом є інтеграція цифрових технологій, таких як Internet of Things (IoT), яка дозволяє здійснювати реальний моніторинг і управління функціонуванням теплопостачання в режимі реального часу. Доведено, що завдяки аналітиці даних та алгоритмам штучного інтелекту, можна передбачати потреби в енергії, що, в свою чергу, знижує витрати і підвищує ефективність систем.

Проблеми, які були розглянуті в цій статті та потребують залучення інноваційних технологій в даній сфері для їх вирішення, також наразі є актуальними для більшості європейських країн, саме тому у своїх Національних енергетичних та кліматичних планах вони визначають важливу роль пошуку інноваційних технологій для оптимізації систем теплопостачання в умовах міських агломерацій та вважають це критично важливим елементом забезпечення життєдіяльності цих агломерацій.

У статті визначено, що розробка та впровадження цих інноваційних підходів забезпечить не лише оптимізацію систем теплопостачання, але й зменшить негативний вплив на навколишнє середовище, що є критично важливим у рамках сталого розвитку міст. Таким чином, інтеграція інноваційних технологій у теплопостачання є необхідним кроком для забезпечення енергетичної безпеки та їхнього сталого розвитку в умовах швидко змінюваних міських умов.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії (ВДЕ), теплопостачання, сонячні колектори, теплові насоси, енергоефективність, екологічні переваги.

Постановка проблеми. Зі стрімким зростанням міських агломерацій, системи теплопостачання стикаються з величезними викликами, які потребують термінового вирішення. Основними проблемами є значні теплові втрати, залежність від традиційних викопних видів пального, а також високі викиди парникових газів, що негативно впливають на екологію. Більшість існуючих систем є застарілими та не можуть ефективно

реагувати на зростаючий попит на енергію. Крім того, традиційні джерела енергії стають дедалі дорожчими, а їхнє використання супроводжується деградацією навколишнього середовища. Це викликає необхідність у переході до альтернативних джерел енергії, таких як сонячна і вітрова енергія, проте їхня інтеграція у вже існуючі теплові мережі ставить деякі технічні та економічні питання.

Існує також проблема недостатньої обізнаності про переваги використання відновлювальних джерел енергії серед населення та відсутність політичної волі для впровадження нових технологій. Таким чином, постає комплексна задача оптимізації систем теплопостачання через інтеграцію сучасних та ефективних рішень на основі відновлювальних джерел енергії, що дозволить забезпечити екологічну та економічну сталий розвиток міських агломерацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Браун Т. та Вілсон Дж. у статті «Виклики впровадження технологій відновлювальної енергії в міських системах теплопостачання: бар'єри та рішення» аналізуються основні перешкоди, що стоять на шляху інтеграції відновлювальних джерел енергії у сучасні системи опалення. Автори пропонують рішення для подолання цих бар'єрів.

Калогироу С. А. у книзі «Solar Energy Engineering: Processes and Systems» розглядаються різноманітні процеси та системи, що стосуються сонячної енергії. Автор детально описує технології, їхню ефективність та потенціал інтеграції в системи теплопостачання, що робить цю працю важливим ресурсом для дослідників, що працюють у цій області.

Бхатія Р. та Шарма А. у статті «Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption» обговорюється роль зберігання теплової енергії в досягненні сталого споживання енергії. Це дослідження окреслює різні технології накопичення тепла та їхній вплив на загальну ефективність системи теплопостачання.

Чжао Х. та Ван І. у статті «Integration of Solar Heat into District Heating Systems: A Review» проводиться огляд літератури щодо інтеграції сонячного тепла у системи централізованого теплопостачання. Автори підкреслюють важливість таких інтеграцій у зниженні залежності від викопного пального.

Хе В. та Ма Ц. у статті «The Role of Renewable Energy in Urban Heating: A Review of Current Practices» розглядається роль відновлювальної енергії в міському опаленні, акцентуючи увагу на сучасних практиках та їхньому впливі на енергетичні системи.

Німанн П. Е. та Кйер С. Л. у статті «Combining Renewable Energy with District Heating Systems: Opportunities and Challenges» обговорюється ефективність комбінації відновлювальної енергії з системами централізованого опалення, а також виклики, які виникають при цьому.

Розен М. А. та Ле Б. у статті «Sustainable Heat Supply from Renewable Resources in Urban Areas: A Review» аналізуються стратегії забезпечення сталого теплопостачання з відновлювальних джерел в урбаністичних умовах.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження та аналіз інноваційних технологій, які можуть бути впроваджені для оптимізації систем теплопостачання в умовах міських агломерацій.

Виклад основного матеріалу. Традиційні системи теплопостачання часто стикаються з проблемами, такими як неефективність використання енергії, великі теплові втрати та негативний вплив на довкілля. У цьому контексті впровадження інноваційних технологій стає необхідним для оптимізації теплопостачання.

Інтеграція відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в системи теплопостачання є одним із ключових стратегічних підходів, що сприяють зменшенню негативного впливу на довкілля та забезпеченню енергетичної незалежності регіонів. В умовах зростаючого попиту на енергію та виснаження традиційних викопних ресурсів, альтернативні джерела енергії, такі як сонячні, вітрові та геотермальні, стають все більш актуальними.

Одним із прикладів інтеграції ВДЕ є використання сонячних колекторів, які перетворюють сонячну енергію в теплову. Вони можуть бути встановлені на дахах будівель, що дає змогу використовувати вільний простір для генерації енергії. Сонячні колектори забезпечують гарячу воду для опалення, а також можуть застосовуватися для нагріву води для побутових потреб. При правильно спроектованій системі, використання сонячних колекторів може покривати значну частину потреб у гарячій воді у приватних та комерційних приміщеннях.

Теплові насоси є ще одним важливим інструментом в переході до сталого енергетичного майбутнього, оскільки вони суттєво знижують залежність від викопних видів пального, адаптуючи природні ресурси для отримання теплової енергії. Ці пристрої працюють за принципом, схожим на роботу холодильників, але в зворотному напрямку: вони забирають тепло з навколишнього середовища – з землі, води або повітря – і перетворюють його на теплову енергію, яка може використовуватися для опалення приміщень або для гарячого водопостачання [1]. Однією з головних переваг теплових насосів є їхня здатність передавати значно більше енергії, ніж вони споживають. Наприклад, сучасний повітряний тепловий

насос може давати від 4 до 5 кВт тепла, споживаючи лише 1 кВт електричної енергії. Це означає, що для кожного кіловата електричної енергії, витраченої на його роботу, тепловий насос може генерувати від 4 до 5 кВт теплової енергії. Таке співвідношення робить їх надзвичайно ефективними з точки зору енергоспоживання, що веде до суттєвих заощаджень на рахунках за енергію.

Упровадження ВДЕ в системи теплопостачання приносить численні екологічні переваги. Основний ефект полягає в зменшенні викидів парникових газів, оскільки відновлювальні джерела енергії практично не виробляють вуглецю під час експлуатації. Це важливо для боротьби зі зміною клімату і покращення якості повітря в містах. Зменшення використання викопного пального не лише допомагає покращити екологічну ситуацію, а й сприяє розвитку здорового способу життя для мешканців міст.

Економічні переваги використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) є важливим аспектом, який варто розглядати при оцінці їхньої доцільності та впливу на загальну економіку. Однією з найзначніших переваг є зменшення витрат на енергію, що на сьогоднішній день стає особливо актуальним у зв'язку зі збільшенням цін на традиційні енергоресурси.

Хоча початкові витрати на встановлення ВДЕ, такі як сонячні колектори чи теплові насоси, можуть бути вищими, ніж у традиційних системах опалення, проте дані інвестиції часто виправдовують себе з часом. Усталені витрати на традиційні види пального, такі як газ чи нафта, постійно зростають, в той час як ВДЕ, такі як сонячна та вітрова енергія, мають нижчі експлуатаційні витрати. Це відбувається, адже джерела ВДЕ в основному безкоштовні, що означає, що вони не підлягають коливанням на ринку [2].

Що стосується витрат, встановлення ВДЕ може суттєво знизити витрати на електроенергію та опалення. Наприклад, використання сонячних панелей дозволяє власникам у значній мірі забезпечити свої енергетичні потреби, навіть вийти на нульові витрати за рахунок самостійного виробництва енергії. Багато споживачів отримують можливість продавати залишки енергії назад в мережу, що стає додатковим джерелом доходу, а також стимулює їхню економічну активність.

Ще одним важливим фактором, що підвищує доступність ВДЕ, є різноманітні програми підтримки з боку держави. Багато країн пропонують субсидії, податкові пільги або інші форми фінансової підтримки для власників, які встановлюють

сонячні панелі, теплові насоси чи інші системи ВДЕ. Це знижує фінансовий тягар для споживачів на початковому етапі впровадження, роблячи технології більш привабливими для широкого загалу.

Впровадження ВДЕ не лише приносить вигоди окремим домогосподарствам, але також позитивно впливає на економіку в цілому. Розвиток індустрії ВДЕ створює нові робочі місця, адже для монтажу та обслуговування цих систем потрібні кваліфіковані спеціалісти. Це, в свою чергу, стимулює розвиток суміжних галузей та покращує загальний рівень зайнятості.

Не слід також забувати й про екологічний аспект. Використання ВДЕ сприяє зменшенню викидів парникових газів, що є важливим кроком у боротьбі зі змінами клімату. Поліпшення екологічної ситуації може призвести до зниження витрат на охорону здоров'я та покращення загального стану здоров'я населення, що в подальшому також може знизити економічні витрати для держави [1, 3].

Дослідження показують, що попит на ВДЕ зростає в найближчі роки. Інновації в галузі технологій ВДЕ, зокрема, зниження вартості встановлення та підвищення ефективності, загалом роблять їх ще більш привабливими для споживачів. З розвитком технологій, таких як зберігання енергії, можна очікувати, що використання ВДЕ в поєднанні з системами зберігання створить нові можливості для енергетичної самодостатності домогосподарств.

Враховуючи всі ці фактори, можна стверджувати, що економічні переваги використання ВДЕ є суттєвими та багатограними. Вони не лише знижують індивідуальні витрати на енергію, але й сприяють розвитку економіки, покращенню екологічних показників та загальному підвищенню якості життя в містах і регіонах. Перехід до відновлювальної енергетики стає не лише вимогою часу, але й практичною необхідністю для забезпечення сталого розвитку.

Однак, незважаючи на численні переваги, впровадження ВДЕ в системи теплопостачання стикається з деякими викликами. По-перше, необхідно провести детальну оцінку ресурсів та потужностей для кожного конкретного регіону, щоб визначити найбільш ефективне рішення. Також важливо забезпечити належне обслуговування та моніторинг систем для досягнення максимального ефекту в межах їх експлуатації [3].

Крім того, варто звернути увагу на інтеграцію ВДЕ з існуючими тепловими мережами. Це може вимагати вдосконалення інфраструктури,

що коригує систему постачання, і впровадження нових технологій для забезпечення стабільності електропостачання, особливо в періоди, коли виробництво енергії з ВДЕ є нерегулярним.

Отже, інтеграція відновлювальних джерел енергії в системи теплопостачання є важливим кроком до сталого розвитку. Вона дозволяє значно зменшити екологічні та економічні ризики, пов'язані з традиційними системами, і спонукає до розвитку інноваційних рішень. Завдяки правильно спроектованим та реформованим системам, можна досягти високих результатів у забезпеченні енергетичної незалежності міст та покращенні якості життя їх мешканців. Існуючі виклики вимагають комплексного підходу та активного впровадження технологій, що, в свою чергу, забезпечить енергетичну безпеку і екологічну стійкість на наступні десятиліття.

Говорячи про модернізацію систем теплоаккумуляції, варто підкреслити, що теплоаккумулятори є незамінними елементами для балансування навантаження в системах теплопостачання. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні стабільного постачання тепла, особливо в умовах змінного попиту протягом доби. Наявність ефективних теплоаккумуляційних систем дозволяє відокремити процес виробництва тепла від його споживання, що призводить до більш раціонального використання енергії [2].

Сучасні технології відкривають нові горизонти для використання нових матеріалів та рішень, покликаних зменшити теплові втрати в системах теплоаккумуляції. Наприклад, нові теплоізоляційні матеріали, такі як аерогелі та високоефективні пухирчаті або мікрокомполімерні структури, можуть значно знизити теплові втрати в процесі транспортування тепла. Це важливо, оскільки значна частина енергії втрачається саме під час транспортування теплоносія від джерел тепла до споживачів.

Зменшення теплових втрат підвищує енергоефективність системи в цілому, що не лише знижує витрати, але й сприяє зменшенню викидів парникових газів. Використання інноваційних рішень у конструкції теплоаккумуляторів також веде до збільшення їхнього обсягу та зменшення ваги, що спрощує монтаж та обслуговування систем. Автоматизація систем тепло- і водопостачання через впровадження сучасних технологій управління є ще одним важливим етапом оптимізації [4].

Використання датчиків, IoT (Internet of Things) та систем управління енергоспоживанням надає можливість здійснювати моніторинг реального

стану системи в режимі реального часу. Це дозволяє коригувати її роботу з урахуванням змін попиту, що значно підвищує загальну ефективність і надійність системи.

Впровадження IoT-технологій дозволяє збирати дані про температурний режим, тиск, обсяги потоку та інші ключові параметри системи. Завдяки цій інформації система управління може автоматично реагувати на зміни: наприклад, збільшувати або зменшувати подачу тепла залежно від потреби в опаленні в даний момент.

Інтеграція систем автоматизації у модулі дистанційного моніторингу забезпечує централізоване управління, що спрощує процес прийняття рішень. Завдяки сучасним технологіям моніторингу й аналізу даних, можна оперативно виявляти технічні несправності та неполадки системи. Виявлення проблем на ранніх етапах дозволяє уникнути серйозних аварій, які можуть призвести до великих витрат на ремонт та обслуговування. Це також підвищує загальну надійність системи, адже користувачі отримують впевненість у тому, що їхня система буде працювати безперебійно протягом тривалого часу [5].

Оптимізація систем теплоаккумуляції та їх автоматизація внаслідок впровадження сучасних технологій управління не лише забезпечує економію енергії, але й активно впливає на сталий розвиток міст. Зменшення енергетичних витрат і зниження викидів парникових газів від систем теплопостачання сприяють покращенню екологічного стану регіонів, де ці системи впроваджуються.

Модернізація систем теплоаккумуляції, зокрема через впровадження нових технологій та матеріалів, а також автоматизацію управління, є критично важливим етапом у забезпеченні енергоефективності і надійності систем теплопостачання. Це не тільки веде до скорочення витрат на енергію, але й позитивно впливає на екологічні показники та сталий розвиток міст, в яких реалізують ці інноваційні рішення. У глобальному контексті ці зусилля можуть суттєво сприяти досягненню цілей у сфері енергетичної безпеки та сталого розвитку [6].

Аналітичні інструменти та алгоритми штучного інтелекту (ШІ) відіграють дедалі важливішу роль у сучасних системах теплопостачання. Вони дозволяють моделювати та прогнозувати потреби в тепловій енергії з високим ступенем точності, що, в свою чергу, відкриває нові можливості для оптимізації роботи таких систем.

Системи теплопостачання зазвичай підлягають значним коливанням попиту, залежно від численних факторів, таких як зміна погодних умов,

сезонність, а також інтенсивність використання будівель. Ці фактори можуть суттєво впливати на потреби в теплі, і використання аналітичних інструментів здатне допомогти виявити закономірності та залежності, що характерні для конкретних умов. Завдяки вмілому застосуванню алгоритмів машинного навчання, аналіз даних стає більш гнучким і відповідає актуальним вимогам. Спеціалізовані моделі, побудовані на базі попередніх даних про споживання теплової енергії, можуть справлятися з відносно складними задачами, як-от передбачення піків споживання у певний час доби або у специфічних погодних умовах. Для цього, наприклад, використовуються нейронні мережі та регресійні моделі, які здатні адекватно реагувати на зміни зовнішніх чинників.

Основна мета такого моделювання – адаптація графіків постачання та споживання енергії, що дозволяє максимально скоригувати використання ресурсів відповідно до фактичних потреб споживачів. Це особливо важливо в умовах обмежених ресурсів і високих витрат на енергію. Зменшення витрат є одним з ключових аспектів, адже правильна стратегія управління теплозабезпеченням може призвести до значної економії для енергетичних компаній і кінцевих споживачів [4, 5, 1].

Зекономлені ресурси можуть бути перенаправлені на інші потреби, такі як інвестиції в модернізацію інфраструктури або розвиток нових проєктів. Існує також важливий екологічний аспект – знижуючи навантаження на енергетичні системи і зменшуючи споживання викопних видів пального, суспільство зможе зменшити викиди парникових газів, поліпшуючи екологічну ситуацію в регіонах.

Вдосконалення моніторингу й управління системами теплопостачання за допомогою штучного інтелекту не лише робить їх більш ефективними, але й дозволяє забезпечити високий рівень надійності постачання.

Кінцевим результатом впровадження таких технологій стає не лише економія коштів, але і зменшення навантаження на графік споживання енергії, що робить системи теплопостачання більш адаптивними і усталеними у процесі зміни умов зовнішнього середовища і попиту. Отже, можна стверджувати, що використання аналітичних інструментів і алгоритмів штучного інтелекту в системах теплопостачання є ключовим фактором для забезпечення ефективності, зниження витрат і покращення екологічних показників у сучасних міських умовах. Це відкриває нові горизонти для розвитку енергетичних систем, які адаптуються

до змін, пропонуючи більш стабільне та сталим забезпечення теплом для всіх споживачів [7].

Висновки. Впровадження інноваційних технологій у системи теплопостачання в умовах міських агломерацій є критично важливим кроком у напрямку сталого розвитку та енергоефективності. Це стратегічний процес, який вимагає комплексного підходу та співпраці між різними учасниками, включаючи місцеві органи влади, енергетичні компанії, науковці та громадськість. Одним із ключових аспектів є створення інтегрованих різноманітних енергетичних рішень, які враховують специфічні потреби міських агломерацій. Це включає в себе комбінування традиційних джерел енергії з відновлювальними, такими як сонячна, вітрова, та геотермальна енергія. Використання теплових насосів, систем зберігання енергії та комбінованих виробництв тепла та електричної енергії (ТЕЦ) може знизити залежність від викопних видів пального та покращити енергоефективність.

Адаптація сучасних технологій до потреб міст є ще одним важливим елементом. Наприклад, впровадження «розумних» технологій управління енергоспоживанням дозволяє оптимізувати роботу систем теплопостачання, зменшуючи втрати тепла та підвищуючи швидкість реагування на зміни попиту. Такі технології можуть включати сенсори для моніторингу температури та тиску, системи автоматизації, а також програмне забезпечення для управління енергетичними потоками.

Впровадження обґрунтованого моніторингу та контролю є критичним компонентом для забезпечення ефективності роботи систем теплопостачання. Завдяки сучасним аналітичним інструментам і платформам для збору та обробки даних, енергетичні компанії можуть отримати точну інформацію про стан інфраструктури, виявляти проблеми на ранніх стадіях і своєчасно їх усувати. Це також дозволяє прогнозувати навантаження та управляти споживанням енергії в реальному часі.

В результаті підвищення ефективності систем теплопостачання, мешканці міст отримують поліпшення умов життя, знижуючи витрати на енергію та підвищуючи комфортність своїх домівок. Системи, які працюють на основі відновлювальних джерел енергії, сприяють зниженню викидів парникових газів, що, в свою чергу, покращує екологічні показники міст і сприяє здоров'ю населення.

Зміцнення екологічних показників міст є вигідним не лише для мешканців, але й для всіх учасників міського середовища. Інвестиції в інноваційні

технології в системах теплопостачання можуть призвести до зниження витрат на енергію, покращення інфраструктурних об'єктів та створення нових робочих місць у сфері відновлювальних джерел енергії та енергетичної ефективності. Це, у свою чергу, стимулює розвиток місцевої еконо-

міки та підвищує загальну конкурентоспроможність міст. Таким чином, дозволяючи інтеграцію інноваційних технологій у системи теплопостачання, ми робимо важливий крок до спільного сталого майбутнього, яке принесе вигоду як поточним, так і майбутнім поколінням.

Список літератури:

1. Браун Т. та Вілсон Дж. Виклики впровадження технологій відновлювальної енергії в міських системах теплопостачання: бар'єри та рішення. «Енергетична політика». № 163, 2023. 112824. DOI: 10.1016/j.enpol.2023.112824.
2. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press. 2014. ISBN: 978-0-12-397573-9.
3. Bhatia R., Sharma A. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. «Renewable and Sustainable Energy Reviews». 2021. p.144. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111036.
4. Zhao H., Wang X. Integration of Solar Heat into District Heating Systems: A Review.» *Energy Procedia*. 2018. P 144-154. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.030.
5. He W., Ma Z. The Role of Renewable Energy in Urban Heating: A Review of Current Practices. «Energy Reports» № 6. 2020. P. 909-917. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.07.025.
6. Niemann P. E., Kjaer S. L. Combining Renewable Energy with District Heating Systems: Opportunities and Challenges. «Energy». 2019. P.1223-1234. DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.131.
7. Rosen M. A., Le B. Sustainable Heat Supply from Renewable Resources in Urban Areas: A Review. «Environmental Science & Technology». 2021. 55(3), 1234-1246. DOI: 10.1021/acs.est.0c06565.

Kharytonov Yu.M., Poberii M.V. INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR OPTIMIZING HEATING SYSTEMS IN URBAN AGGLOMERATIONS

This article is devoted to the search for relevant innovative technologies for optimizing heat supply systems in urban agglomerations, since their rapid growth requires the need to improve heat supply systems, which are key elements of energy efficiency of urban infrastructure. It is determined that innovative technologies, such as the integration of renewable energy sources (RES), the use of modern heat accumulators, automated control and monitoring systems, allow optimizing the operation of heat networks. First of all, it is proven that the introduction of renewable energy sources, such as solar collectors and heat pumps, reduces dependence on traditional fuels, contributing to the expansion of the «green» energy portfolio.

The article examines how the modernization of existing heat accumulators and heat transfer systems using innovative materials provides increased energy efficiency and reduced heat losses. It is found that the introduction of new automated control systems allows not only to optimize energy consumption, but also significantly improves the reliability and flexibility of the system in conditions of fluctuations in heat demand.

It was also found that an important aspect is the integration of digital technologies, such as the Internet of Things (IoT), which allows for real-time monitoring and management of the operation of the heat supply. It has been proven that thanks to data analytics and artificial intelligence algorithms, it is possible to predict energy needs, which, in turn, reduces costs and increases the efficiency of the systems.

The problems that were considered in this article and require the involvement of innovative technologies in this area to solve them are also currently relevant for most European countries, which is why in their National Energy and Climate Plans they identify the important role of finding innovative technologies for optimizing heat supply systems in urban agglomerations and consider this a critically important element of ensuring the vitality of these agglomerations.

The article determines that the development and implementation of these innovative approaches will ensure not only the optimization of heat supply systems, but also reduce the negative impact on the environment, which is critically important within the framework of sustainable urban development. Thus, the integration of innovative technologies into heat supply is a necessary step to ensure energy security and their sustainable development in rapidly changing urban conditions.

Key words: renewable energy sources (RES), heat supply, solar collectors, heat pumps, energy efficiency, environmental benefits.

Дата надходження статті: 25.07.2025

Дата прийняття статті: 11.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.041.8:628.4.043

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/24>**Волошин В.С.**

Приазовський державний технічний університет

Ткаленко І.

компанія AMCOM GROUP LLC, США

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВЗАЄМОДІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ ПРИ ЇХ РЕЦИКЛІНГУ

Робота присвячена вивченню оцінки ефективності технологічної взаємодії (далі просто «взаємодія») металургійних відходів з метою отримання з них товарної продукції. В її основі лежить метод використання багатовимірної матриці суміжності для впорядкованих металургійних відходів певним чином, критерієм впорядкованості для яких є термодинамічні показники: зміна ентропії системи з окремих відходів на корисний продукт, а також сумарна ентропія корисного продукту по відношенню до ентропії окремих вихідних відходів. У роботі досліджено 12 найбільш типових металургійних відходів, включаючи шлаки, шлами, пил і окалину з різних металургійних джерел. Встановлено досить тісний зв'язок багатокомпонентних металургійних відходів як сировини для товарної продукції за показниками їх ефективності на користь більш структурованих багатокомпонентних сумішей. Показано, що ефективність багатокомпонентних сумішей на основі металургійних відходів на прикладі технологій їх брикетування може зростати зі збільшенням складової вихідної відпрацьованої сировини. Структурні зміни у вигляді одного або двох компонентів у вихідній суміші є причиною іноді значних змін якості одержуваного продукту, в даному випадку брикету, його хімічних, механічних і термостійких властивостей. Склади брикетів, отримані шляхом аналізу більш складних матриць суміжності, дозволяють значно розширити номенклатуру можливої товарної продукції, яку отримують шляхом переробки відомих металургійних відходів. Запропонована чотирикомпонентна матриця суміжності підтверджує можливість створення, насамперед, не тільки стандартного брикету заданого складу з високою механічною міцністю на стиск (≥ 200 кг на брикет), температурною стійкістю (800–1000 °С) та хімічним складом (Fe 50–60%, C 10–15%), але й альтернативні комбінації формул сумішей, отриманих матричним шляхом. Вони мають забезпечувати децю вищі властивості, ніж «стандартний» брикет, що робить їх цілком придатними, але більш економічними як альтернатива для застосування в доменній плавці чи як самовідновлювальні брикети в електросталеплавильному виробництві.

Ключові слова: металургійні відходи, брикети, ентропія, зміна ентропії, компоненти, матриця суміжності.

Постановка проблеми. При всіх відомих можливостях, щодо рециклінгу металургійних відходів, ефективність вторинних продуктів їх переробки далека від потребуємої, знаходиться в широкому діапазоні і підлягає системному аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тверді металургійні відходи – шлаки, шлами, металургійний пил і шлак займають значну нішу мінеральних промислових втрат, обсяги яких у всьому

світі не тільки не зменшуються, але й мають тенденцію до систематичного збільшення [1, с. 825]. Одним з ефективних способів мінімізації твердих металургійних відходів є їх комплексна переробка і пов'язані з ними нові матеріали, сировинні та металізовані брикети, суміші, в'язучі речовини і заповнювачі [2, с. 53–61, 3, с. 28, 4, с. 21–25, с. 48]. Їх виробництво обумовлено широким спектром фізико-хімічних, гранулометричних та інших вивчених властивостей вихідних металургійних

відходів. Як правило, при переробці таких відходів суттєву роль грає компонентність складу одержуваної суміші, з якої різними способами отримують деякі товарні продукти. Отже, набір сировини для таких технологічних процесів виявляє перелік видів металургійних відходів, що використовуються в кожному конкретному випадку. Залежно від їх складової можна отримати широкий асортимент нових продуктів, які мають свою товарну цінність і використовуються в різних галузях сучасної промисловості [5, с. 286, с. 291–292].

Постановка завдання. Ціллю роботи є поширення номенклатури товарної продукції, що отримується з металургійних відходів завдяки використанню механізмів управління багатомірними матрицями суміжності, що створені на їх основі.

Виклад основного матеріалу. Будь-який технологічний процес орієнтований на отримання певної корисної продукції. Відходи є неминучою складовою таких процесів і являють собою продукт з неупорядкованою структурою або апріорі незмінними властивостями деяких компонентів сировинної бази технологічного процесу. Тоді одержуваний товарний продукт від цього технологічного процесу є певною впорядкованою частиною сировини, з якої її отримують. Мірою неупорядкованості таких систем є їх ентропія або зміна ентропії в залежності від прийнятих дій. Аналогічний підхід в іншому тлумаченні був описаний в роботі [6, с. 346–347].

Систематизуємо 12 найбільш типових металургійних відходів, які складають значну частку

всіх промислових відходів, що зберігаються на Землі, і які ляжуть в основу наших подальших досліджень (таблиця 1).

Для кожного відходу b_p , де: $p = 1, 1, 12$, визначається величина ентропії $S_p = S_q$, як показник неупорядкованості системи, де $q = 1, 1, 12$ – значення q -го відходу, як відповідна реакція на взаємодію з p -м відходом. Кожна взаємодія порівнюється зі зміною ентропії $\Delta S_{p,q}$ при парній взаємодії металургійних відходів, виходячи з їх фізико-хімічних і механічних та термічних властивостей. Для моделювання трьох- або чотирьохкомпонентних брикетів за їх складом беремо за основу матрицю суміжності відповідного формату – з двох-, трьох-, або чотирьохкоординатної p, q, r, t – сіткою (рис. 1 і рис. 2).

Як впливає з даних (рис. 3), існує досить чітка градація багатокомпонентних металургійних відходів як сировини для товарних продуктів за їх ефективністю. Наприклад, у залежності від хімічного і гранулометричного складів, наявності в сумішах в'язучих речовин ефективність двокомпонентних сумішей на основі шламу, пилу або окалини не може перевищувати 60% від початкової кількості прийнятих металургійних відходів.

Для трикомпонентних виробів ця ефективність досягає вже 60–80%, а для чотирьохкомпонентних – понад 90%. Наприклад, в металургії ефективність такої продукції визначається якістю екстрагування металу, в будівельній галузі – поліпшенням фізико-хімічних властивостей мате-

Таблиця 1

Маркування і ентропія для основних металургійних відходів, прийнятих в роботу

№№ (p)*	Назва Відходу	Означення відходу	Ентропія S_p , у.е.
1	Доменний шлам	b_1	4,0
2	Конвертерний шлам	b_2	3,9
3	Доменний (колошниковий) пил	b_3	3,8
4	Конвертерний пил	b_4	3,7
5	Електросталеплавильний пил	b_5	3,6
6	Конвертерний шлак	b_6	2,7
7	Електросталеплавильний шлак	b_7	2,6
8	Доменний шлак	b_8	2,5
9	Електросталеплавильна окалина	b_9	1,9
10	Конвертерна окалина	b_{10}	1,8
11	Мельнична окалина	b_{11}	1,8
12	Прокатна окалина	b_{12}	1,7

* – надалі в індексації відходів приймається що $p \sim q \sim r \sim t$

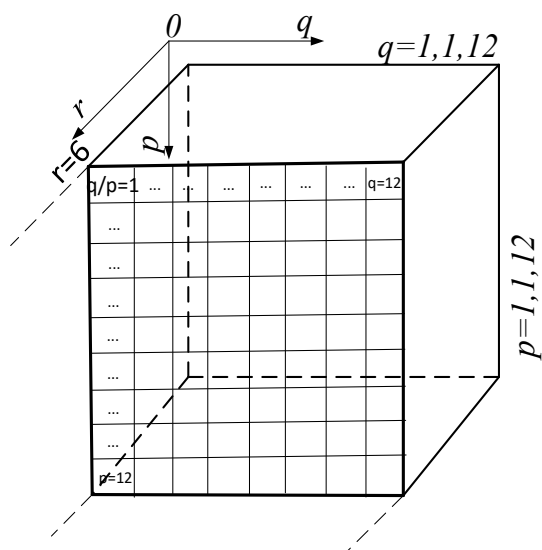


Рис. 1. Графічна модель матриці суміжності для 12 металургійних відходів в розрізі з $r=6$

ріалів. Енергоефективність визначається більш економічними методами комплексного рециклінгу металургійних відходів, а економічна ефективність базується на мінімальній витраті вихідних компонентів.

Матриця суміжності дозволяє оцінити, чи зможуть двійки відходів з індексами p та q взаємодіяти для отримання товарної продукції як безпосередньо, так і з використанням додаткових матеріалів. Взаємодії умовно оцінюються на основі фізико-хімічної сумісності (наприклад,

хімічний розподіл і гранулометричний склад, реакційна здатність) і задокументованих процесів рециклінгу. Знак «+» у двокomпонентній матриці виду (табл. 2) вказує на можливу взаємодію, що веде до корисного продукту (наприклад, цементу, заповнювачів або відновлення металу), а «-» вказує на відсутність відомої або іншої практичної взаємодії через несумісні властивості або відсутність процесів.

В якості попереднього результату ентропія кінцевого продукту в цьому дослідженні була розрахована за допомогою непрямих і корелятивних оцінок. Для розрахунку використовувалася спрощена модель Шеннона, адаптована під хімічну та структурну складність компонентів: $S_i = -\sum P_j \ln P_j + S_{\text{структ.}}$, де: P_j – імовірність знаходження компонента j (оцінюється, наприклад, за часткою основних оксидів або металів) у відходах; $S_{\text{структ.}}$ – внесок ентропії від фазового стану і розміру частинок (оцінюється якісно) для j -го компоненту.

Зміна ентропії системи по відношенню до взаємодії двох відходів визначається як $\Delta S_{p,q} = S_{\text{прод.}} - (S_p + S_q)$ де: $S_{\text{прод.}}$ – ентропія результуючої системи після взаємодії, яка оцінюється виходячи з характеру і числа взаємодій, а також властивостей продукту; S_p і S_q – стандартна ентропія окремих відходів. Якщо в результаті взаємодії утворюється впорядкована система (наприклад, кристалічний продукт, агломерат), то $\Delta S_{p,q} < 0$. Якщо продукт залишається неупорядко-

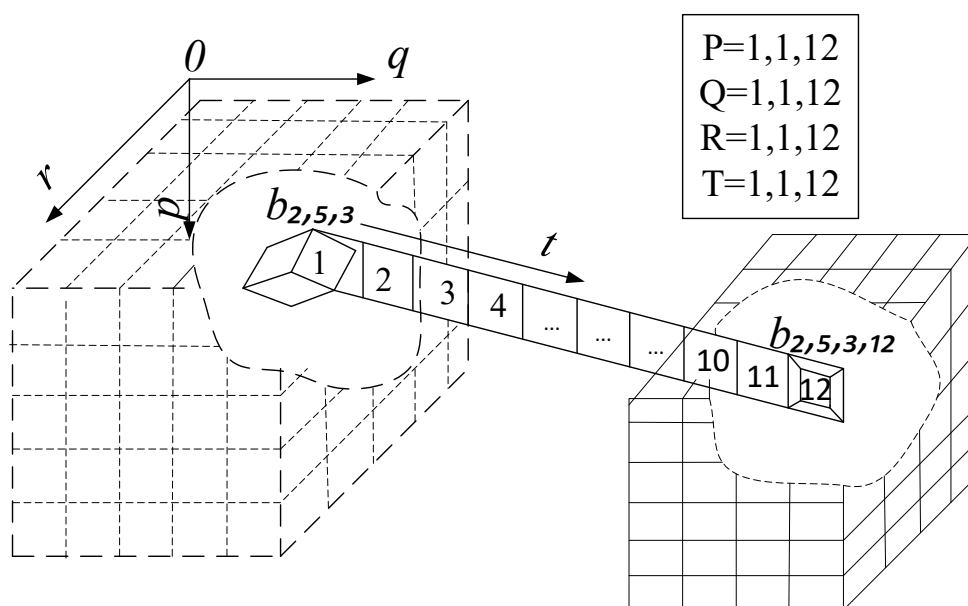


Рис. 2. Модель чотирьохкомпонентної чотиривимірної матриці суміжності для 12 типів металургійних відходів та ілюстрація моделі брикету, яка прийнята за стандарт з формулою взаємодії $b_{\text{брик}} = b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$.

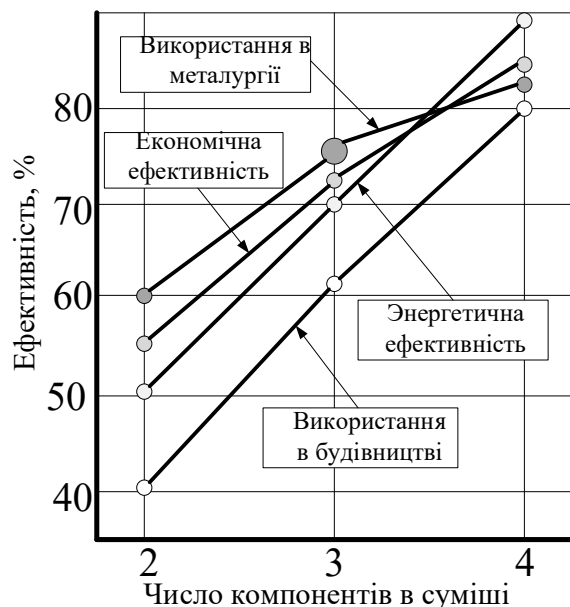


Рис. 3. Ефективність використання перероблених багатокомпонентних металургійних відходів

ваним (наприклад, аморфний шлак), то $\Delta S_{p,q} \rightarrow 0$ або злегка позитивний.

Ключовим моментом в методі, заснованому на аналізі багатовимірної матриці суміжності, є співвідношення близькості взаємодії між заданими компонентами промислових відходів і їх термодинамічними параметрами: зміною ентропії в процесі взаємодії і величиною ентропії кінцевого товарного продукту.

Двовимірна матриця суміжності для $b_{p,q}$ показує, що переважна більшість двійок відходів b_p, b_q

може взаємодіяти з утворенням цінних продуктів, таких як цемент, метали, заповнювачі, шлакові ситалі та добрива. Але ефективність їх не велика. Найбільш значна зміна ентропії для одержуваного продукту спостерігається при взаємодії сильно неупорядкованих відходів (пил, шлак) з упорядкованими відходами (окаліною, шлаком).

Далі ми розглянемо багатокомпонентні (в даному випадку чотирьохкомпонентні) взаємодії металургійних відходів для створення стандартних і альтернативних брикетів. Такий підхід, заснований на переробці комплексу неорганічних відходів, дає більше можливостей для пошуку прийнятних варіантів отримання товарної продукції [7, с. 1596]. Метод заснований на аналізі трикомпонентної матриці суміжності b_p, b_q, b_r (див. рис. 1) з розширенням її до чотирьохкомпонентної матриці b_i, b_p, b_q, b_r шляхом відображення параметрів, необхідної для аналізу комірки трикомпонентної матриці суміжності з параметрами b_p, b_q, b_r та визначення її суміжності щодо компоненти $b_i (i=1,12)$ (див. рис. 2). Як і раніше, за показник ефективності використання металургійних відходів ми беремо динамічні зміни ентропії як фактор, що визначає не тільки стабільність, але і конструкційні властивості одержуваного продукту, в даному випадку брикетів. У методі розраховується повна ентропія брикету $S_{\text{брик}}$ і зміну ентропії $\Delta S_{p,q,r,d}$ для стандартного брикету як показники рівня неупорядкованості в його структурі, в тому числі в динаміці, а також такі, що визначають альтернативні комбінації металургій-

Таблиця 2

p/q	$\Delta S_{p,q}$											
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
b_1	-	-1,55	-1,74	-1,61	-1,58	-2,09	-2,05	-2,01	-1,82	-1,77	-1,75	-1,78
b_2	+	-	-1,59	-1,55	-1,52	-1,91	-1,89	-1,88	-1,74	-1,75	-1,71	-1,69
b_3	+	+	-	-1,48	-1,54	-	-	-	-1,64	-1,61	-1,59	-1,59
b_4	+	+	+	-	-1,44	-1,81	-1,79	-1,78	-1,65	-1,63	-1,60	-1,59
b_5	+	+	+	+	-	-1,75	-1,72	-1,69	-1,54	-1,54	-1,51	-1,49
b_6	+	+	-	+	+	-	-1,33	-1,29	-1,16	-1,14	-1,11	-1,09
b_7	+	+	-	+	+	+	-	-1,21	-1,13	-1,11	-1,10	-1,10
b_8	+	+	-	+	+	+	+	-	-1,12	-1,12	-1,10	-0,9
b_9	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-0,85	-0,83	-0,81
b_{10}	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-0,77	-0,71
b_{11}	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-0,70
b_{12}	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-

них відходів для отримання нестандартного брикету з аналогічними або кращими властивостями (механічна міцність, термостійкість, хімічний склад) і з урахуванням зміни ентропії системи.

Для стандартного складу брикету ($b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$) і обчислюються альтернативні комбінації: зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t} = S_{\text{прод.}} - (S_p + S_q + S_r + S_t)$, де $S_{\text{прод.}}$ – ентропія брикету (оцінюється в 1,5 у.о. за аналогією з цементно-зв'язаним агломератом), а також сумарна ентропія $S_{\text{повн}} = S_p + S_q + S_r + S_t$.

Нижче представлений фрагмент матриці, що включає складову стандартного брикету і його альтернативні варіанти, які забезпечують аналогічні, або інші властивості. Повна матриця (12х12х12х12) досить велика для ілюстрації, тому її ключові комірочки показані наступним чином (табл. 3).

Альтернативні комбінації в матриці засновані тільки на структурних варіантах і отриманих завдяки цьому нових властивостях готового продукту (брикету). Визначаються види відходів, що дозволяють отримати брикет зі схожими властивостями, виходячи зі складу і технології брикетування.

Розглянемо стандартний брикет, що має чотири складові b_2, b_5, b_3, b_{12} . Його формула: $b_{\text{брик}} = b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$ включає конвертерний шлам,

електросталеплавильний та доменний пил і прокатну окалину. Ентропія компонентів ($S_2 = 3.9$), ($S_5 = 3.6$), ($S_3 = 3.8$), ($S_{12} = 1.7$). Повна ентропія системи, включає параметри всіх компонентів $S_{\text{повн}} = 13.0$ у.о.

Ентропія отриманого брикету: $S_{\text{брик}} = 1.5$ у.о. (попередньо, ентропійний аналог цементно-зв'язаного агломерату). Зміна ентропії системи: $\Delta S_{2,5,3,12} = S_{\text{брик}} - (S_2 + S_5 + S_3 + S_{12}) = 1.5 - (3.9 + 3.6 + 3.8 + 1.7) = 1.5 - 13.0 = -11.5$ у.о.

Властивості брикетів.

Механічна міцність поділяється на міцність на стиск ≥ 200 кг на брикет, готового брикету при стиранні $\leq 10\%$ (барабанне випробування), завдяки композитній мінерально-полімерній зв'язці (1–2%) і коксовому відсіву, який забезпечує вуглець для відновлення. Умовою температурної стійкості є стійкість брикету до температурних деформацій в межах 800–1000 °С за рахунок оксидів заліза (Fe_2O_3) у складі окалини та пилу, а також вуглецю в b_3 , що запобігає розкладанню при відновленні. Хімічний склад характеризується високим вмістом Fe (50–60% з окалини та пилу), вуглецю (10–15% від b_3 і коксу), CaO (2–5% від b_2 , Zn і Pb (частка цих компонентів впливає на спосіб застосування брикетів). Умовний технологічний

Таблиця 3

$b_{p,q,r}$	$b_{p,q,r,t}, \Delta S_{2,5,3,12}$			
	$b_2 / b_5 / b_3$	$b_2 / b_5 / b_1$	$b_2 / b_3 / b_1$	$b_5 / b_3 / b_1$
$b_2 / b_5 / b_3$ ($t=1$)	-	+(-2,5)	+(-2,5)	+(-2,5)
$b_2 / b_5 / b_1$ ($t=1$)	-	-	-	+
$b_2 / b_3 / b_1$ ($t=1$)	+	+	-	-
$b_5 / b_3 / b_1$ ($t=1$)	+	+(-2,4)	+(-2,4)	-
...	...	...	...	...
$b_{p,q,r}, t=1 \div 12$	-	-	-	-
...	...	...	...	...
$b_2 / b_5 / b_1$ ($t=12$)	-	-	+(-2,3)	+(-2,2)
...	...	...	...	...
$b_2 / b_3 / b_1$ ($t=12$)	+	+(-2,3)	-	+(-2,0)
...	...	...	...	...
$b_2 / b_3 / b_1$ ($t=10$)	-	+(-2,2)	-	+(-1,9)
...	...	...	...	...
$b_2 / b_5 / b_3$ ($t=12$)	-	+(-2,2)	+(-2,1)	+(-2,1)
...	...	...	...	...
$b_5 / b_3 / b_1$ ($t=12$)	+(-2,1)	+(-1,9)	+(-1,8)	+(-1,4)
...	...	...	...	...
$b_5 / b_3 / b_1$ ($t=11$)	+(-2,0)	+(-1,8)	+(-1,5)	-

процес включає змішування компонентів стандартного брикету b_2, b_5, b_3, b_{12} з відсівом коксу (5–10%) і композитною мінерально-полімерною зв'язки (1–2%), пресування під тиском 10–15 МПа (шнековий прес), сушку при 150–500 °С. Брикетти можуть використовуватися в доменній плавці або як самовідновлювальні брикетти в електросталеплавильному виробництві для відновлення заліза залежно від вмісту Zn і Pb.

Альтернативні комбінації для нестандартного брикету, які є предметом пошуку за допомогою чотиривимірної матриці суміжності, повинні відповідати умовам аналогізації їх властивостей зі стандартним брикетом (механічна міцність ≥ 200 кг на брикет, температурна стійкість до 800–1000 °С, хімічний склад з високим вмістом заліза та вуглецю). Підбираються комбінації, які замінюють один або кілька компонентів стандартного брикету, але зберігають синергетичний ефект за рахунок зниження ентропії системи в цілому. Термодинамічні характеристики альтернативних брикетів представлені в таблиці 4.

Заміна b_3 (доменний пил) на b_1 (доменний шлам) зберігає високий вміст вуглецю і заліза, але забезпечуючи міцність і відновлювальні властивості брикету. Заміна b_{12} (прокатна окалина) на b_9, b_{10}, b_{11} (інші окалини) підтримує високий вміст Fe_2O_3 в брикеті (70–80%), необхідний для доменної плавки.

Комбінації можуть включати шлам або пил b_1, b_2, b_3, b_5 для вуглецю, та окалину $b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}$ для вмісту заліза, що забезпечує аналогічний хімічний склад (Fe 50–60%, C 10–15%).

Стандартний брикет (формула $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$) отримується в умовах, коли $\Delta S_{2,5,3,12} = -11,5$ у.о., що свідчить про зниження ентропії за рахунок упорядкованої структури брикету. При цьому $S_{\text{повн}} = 13,0$ у.о., висока через наявність пилу і шламу з високою ентропією.

Альтернативні брикетти (див. табл. 2) повинні мати $\Delta S_{p,q,r,t} < -11,5$ у.о. співставлену для всіх комбінацій (початкова умова порівняльності), оскільки $S_{\text{брик}} = 1,5$ у.о., а $S_{\text{повн}}$ змінюється від 13,2 до 13,5 у.о. за рахунок заміни компонентів з близькими значеннями ентропії. Всі комбінації мають ідентичний $\Delta S_{p,q,r,t}$, але вищий $S_{\text{повн}}$, наприклад, для комбінацій с b_1 (доменний шлам), що робить їх дещо менш кращими за показниками ентропії.

Особливий інтерес для дослідження представляє аналіз зміни окремих параметрів брикетів при альтернативних складах наступних видів, в порівнянні зі стандартним брикетом (формула $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$), що дозволяє робити висновки про продуктивність брикетів із альтернативними компонентними складами, а отже, є підтвердженням об'єктивності методу суміжних матриць. Вихідні дані для аналізу такі.

Таблиця 4
Варіанти компонентності та термодинамічні характеристики альтернативних брикетів

Компоненти брикету	Формула для $b_{\text{брик}}$	$\Delta S_{\text{повн}}$, у.е.		$S_{\text{повн}}$, у.е.
		$\Delta S_{2,5,3,12}$	$\Delta S_{p,q,r,t}$	
Конвертерний шлам Електросталеплавильний пил Доменний шлак Електросталеплавильн. окалина	$b_2 + b_5 + b_1 + b_9$	-11,5	-2,1	13,4
Конвертерний шлам Доменний пил Доменний шлак Конвертерна окалина	$b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$	-11,5	-2,3	13,5
Електросталеплавильний пил Доменний пил Доменний шлак Мельнична окалина	$b_5 + b_3 + b_1 + b_{11}$	-11,5	-1,5	13,0
Конвертерний шлам Електросталеплавильний пил Доменний шлак Прокатна окалина	$b_2 + b_5 + b_1 + b_{12}$	-11,5	-2,2	13,3
Конвертерний шлам Доменний пил Доменний шлак Прокатна окалина	$b_2 + b_3 + b_1 + b_{12}$	-11,5	-2,3	13,4

$(b_2 + b_3 + b_1 + b_{10})$, усереднений склад: Fe: 55%, SiO₂: 20%, CaO: 20%, C: 3%, інше 2%.

$(b_5 + b_3 + b_1 + b_{11})$, усереднений склад: Fe: 60%, SiO₂: 15%, CaO: 15%, Zn: 5%, інше: 5%.

$(b_2 + b_5 + b_1 + b_{12})$, усереднений склад: Fe: 66%, SiO₂: 15%, C: 10%, інше: 9%.

$(b_2 + b_3 + b_1 + b_{12})$, усереднений склад: Fe: 62%, SiO₂: 18%, CaO: 12%, C: 5%, інше: 3%.

$(b_2 + b_5 + b_1 + b_9)$, усереднений склад: Fe: 63%, SiO₂: 10%, C: 20%, інше: 7%.

1. Аналіз параметрів брикетів можна звести до порівняння їх механічної міцності, в залежності від хімічного складу, а саме наявності в'язучих речовин (наприклад, полімерів або цементу, вапна, сульфіто-спиртової барди), і їх взаємодії з компонентами b_p, b_q, b_r, b_t . Різні відходи (наприклад, доменний пил, окалина, шлак) мають різну гранулометрію і хімічну активність, адгезію, що впливає на міцність зв'язків в брикеті. При аналізі враховується ступінь пресування при брикетуванні і властивості брикетів, згідно з нормативними документами [8, с. 11], оптимізація вологості матеріалу (7–11%), а також ентропійний внесок системи ($S_{повн}$), що відображає ступінь неупорядкованості в структурі брикету. Використовуючи такі витяги, порівнюємо альтернативні варіанти брикетних складів зі стандартним брикетом (формула $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$), розглядаючи в якості критерія стабільності структури брикету співвідношення до його термодинамічних параметрів:

- склад $(b_2 + b_3 + b_1 + b_{10})$, це заміна в стандартному брикеті b_5 і b_{12} на b_1 і b_{10} , призводить до зниження міцності брикету, якщо b_{10} (наприклад, шлак) менш ефективно реагує зі сполучною речовиною, ніж b_{12} (наприклад, шлак високої щільності);

- склад $(b_5 + b_3 + b_1 + b_{11})$ включає заміну в стандартному брикеті b_2 і b_{12} на b_1 і b_{11} , що дозволяє підвищити міцність, якщо b_{11} (наприклад, металева стружка) сприяє кращій адгезії;

- склад $(b_2 + b_5 + b_1 + b_{12})$ це заміна b_3 на b_1 , що може тільки не істотно змінити міцність, якщо b_1 і b_3 мають схожі гранулометричні характеристики;

- склад $(b_2 + b_3 + b_1 + b_{12})$ – аналогічно попередньому, але відсутність b_5 може знизити міцність через більш низьку хімічну активність суміші;

- склад $(b_2 + b_5 + b_1 + b_9)$ відповідає стандартному зі зміною b_3 і b_{12} на b_1 і b_9 , що може вплинути на міцність, залежно від природи b_9 (наприклад, якщо це вуглецевмісний матеріал, міцність може збільшуватися через реакції відновлення).

2. Температурний опір (термічна стійкість) характеризує здатність альтернативних брикетів зберігати свою цілісність при більш високих температурах (800–1000°C). В цілому очевидно, що в порівнянні зі стандартним брикетом, склад альтернативного брикету з b_{10} , b_{11} , b_9 може мати вищу термічну стабільність в залежності від їх хімічної природи. Зокрема, b_{11} (металева стружка) сприяє підвищенню термічної стабільності за рахунок металевої матриці, тоді як b_9 (вуглецевмісний матеріал) може зменшити її за рахунок спалювання вуглецю. Однак такі висновки випливають і зі звичайних технологічних знань.

3. Хімічний склад брикетів багато в чому визначається компонентами b_p, b_q, b_r, b_t та додатковими сполучними речовинами, а також наявністю шкідливих для окремих металургійних агрегатів компонентів (наприклад Zn). При заміні компонентів змінюється вміст оксидів, металів, вуглецю і летких речовин, реакційна здатність суміші в металургійних процесах (наприклад, відновлення оксидів заліза в окалино вуглецевих брикетах). Внесок ентропії показує, що збільшення $S_{повн}$ пов'язане зі збільшенням числа компонентів або їх неоднорідністю, але $\Delta S_{p,q,r,t}$ відображає склад при заміні компонентів, який впливає на рівновагу хімічних реакцій.

4. Враховуючи, що ентропія $S_{повн}$ у термодинаміці характеризує ступінь неупорядкованості системи, а для брикетів вона залежить від кількості компонентів, їх фазового стану і ступеня перемішування, цей параметр стає залежним від багатокомпонентного характеру вже й кінцевого продукту та інших показників. Багатокомпонентні суміші, наприклад $b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$ мають більш високу ентропію, ніж брикети з меншою кількістю компонентів. Зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ виникає при заміні компонентів. Наприклад, заміна b_{12} на b_{10} може підвищити ентропію, від того, що b_{10} має більш складну структуру (наприклад, шлак з домішками).

Механічна міцність тісно пов'язана зі $S_{повн}$ таким чином, що з підвищенням $S_{повн}$, як правило, знижується міцність завдяки зростанню неоднорідності структури брикету (див. рис. 4, а). У той же час зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ для такої системи може сприяти як збільшенню, так і зменшенню міцності в залежності від хімічної та фізичної сумісності нових компонентів.

За хімічним складом будемо оцінювати тільки відсоток заліза, який може змінюватися, впливаючи на $\Delta S_{p,q,r,t}$ (див. рис. 4, б). Повна ентропія брикету $S_{повн}$ корелює з різноманітністю компонен-

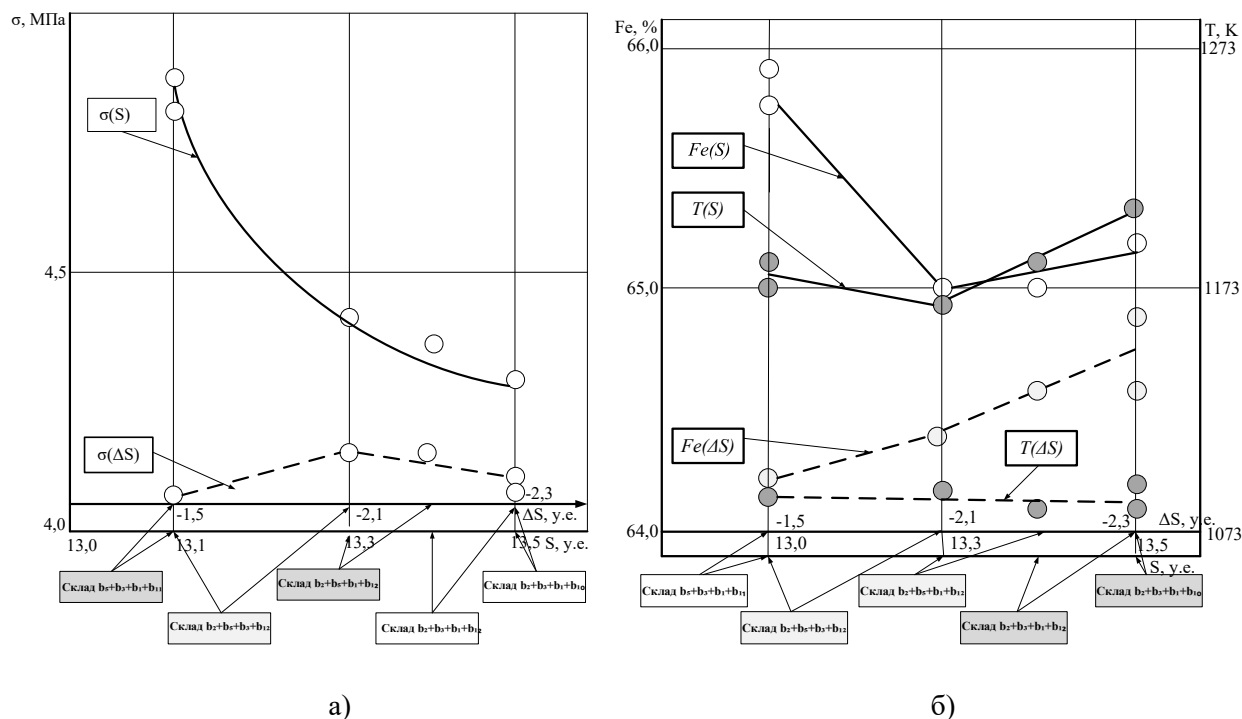


Рис. 4. Параметричні залежності взаємодіючих компонентів металургійних відходів від термодинамічних показників кінцевого продукту переробки. Тут а) – механічні властивості кінцевого продукту переробки, як функція його ентропії або зміни ентропії в процесі переробки; б) – хімічні і термічні властивості кінцевого продукту в залежності від його ентропії або зміни ентропії в процесі переробки

тів в його структурі, що може ускладнити контроль структурного складу (див. рис. 4, б). Темп росту $\Delta S_{p,q,r,t}$ впливає на частку активних компонентів (Fe, C), що визначає реакційну здатність брикету в металургійних процесах.

Температурний опір також залежить від величини ентропії. Зазвичай він збільшується в міру зростання $S_{повн}$ за рахунок утворення рефрактерних фаз (див. рис. 4, б). Висока $S_{повн}$ тісно пов'язана з утворенням малих вогнетривких фаз, що підвищують термічну стабільність всього брикету. Позитивна зміна ентропії $\Delta S_{p,q,r,t}$ може посилити цей ефект, якщо нові компоненти (наприклад, b_{11}) містять оксиди з високою температурою плавлення (більш тугоплавкі).

Відношення до ентропії завжди корелює з другим законом термодинаміки, а збільшення $S_{повн}$ вказує на перехід системи в менш ймовірний стан, що може знизити механічну міцність, але підвищити термічну стійкість за рахунок стабілізації структури.

Висновки. 1. Методика використання багатомірних матриць суміжності дозволяє суттєво розширити номенклатуру кінцевих продуктів в технологіях рециклінгу металургійних відходів за рахунок більш ретельного використання властивостей різних компонентів на користь нової товарної продукції.

2. Чотирьохкомпонентна матриця суміжності, в порівнянні з дво- і трикомпонентними матричними системами, підтверджує можливість створення стандартного брикету ($b_2 + b_5 + b_3 + b_{12}$). Брикету мають високу механічну міцність на стиск (≥ 200 кг на брикет), термостійкість (800–1000 °C) і хімічний склад (Fe 50–60%, C 10–15%). Альтернативні комбінації формул ($b_2 + b_5 + b_1 + b_9$), ($b_2 + b_3 + b_1 + b_{10}$) та інші забезпечують аналогічні властивості, подекуди трохи кращі, ніж у брикетів, прийнятих за «стандартний», що робить їх цілком придатними в якості альтернативи для застосування доменної плавки, чи як самовідновлювальні брикети в електросталеплавильному виробництві.

Список літератури:

1. Matinde, E., Simate, G. S. Mining and Metallurgical Wastes: A Review of Recycling and Re-use Practices. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 118(8), 2018. PP. 825-844.
2. Deus A., Bertani M.-A., Matinde E., Simate, G. S. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. Chapter in Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste, 2019. PP. 51-66.

3. Brandaleze, E., Benavidez, E. R. Treatments and Recycling of Metallurgical Slags. Chapter in Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste, 2019. 19-34.
4. Zhang, Y. (Ed.) Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste. IntechOpen, 2019. 112 p.
5. Motz, H., Geiseler, J. Products of Steel Slags: An Opportunity to Save Natural Resources. Waste Management, 21(3), 2001. PP. 285–293.
6. Potysz, A. Metallurgical Recycling Processes: Sustainability Ratios and Environmental Performance Assessment. Waste Management, Elsevier, 2018. PP. 345-356.
7. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. «The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of ‘Green Concrete’.» Cement and Concrete Research, Elsevier, 2007/ PP. 1590-1597.
8. TU U 07.1-35705445-001:2021 (Technical Specifications of Ukraine).

Voloshyn V.S., Tkalenko I. METHODOLOGY FOR ASSESSING THE INTERACTION OF METALLURGIC WASTE DURING THEIR RECYCLING

The work is devoted to the study of assessing the efficiency of technological interaction (hereinafter referred to as simply «interaction») of metallurgical waste in order to obtain marketable products from them. It is based on the method of using a multidimensional adjacency matrix for ordered metallurgical wastes in a certain way, the criterion of orderliness for which is thermodynamic indicators: the change in the entropy of the system from individual wastes to a useful product, as well as the total entropy of a useful product in relation to the entropy of individual initial wastes. The work examined 12 of the most typical metallurgical wastes, including slags, sludges, dusts, and scale from various metallurgical sources. A sufficient close gradation of multicomponent metallurgical wastes as raw materials for commercial products in terms of their efficiency in favor of more structured multicomponent mixtures has been established. It is shown that the efficiency of multicomponent mixtures based on metallurgical waste, on the example of waste briquetting technologies, can increase with an increase in the componentization of the initial waste raw materials. mixture is the cause of sometimes significant changes in the quality of the resulting product, in this case, the briquette, its chemical, mechanical and heat-resistant properties. Briquette compositions obtained by analyzing adjacency matrices make it possible to significantly expand the range of possible marketable products, which are obtained by processing known metallurgical waste. The proposed four-component adjacency matrix confirms the possibility of creating a standard briquette of a specified composition with high mechanical strength in compression (≥ 200 kg per briquette), temperature resistance (800–1000 °C) and chemical composition (Fe 50–60%, C 10–15%). Alternative combinations of matrix-derived mixture formulas provide slightly higher properties than the «standard» briquette, making them quite suitable but more economical as an alternative for blast furnace smelting applications or as self-reducing briquettes in electric steelmaking production.

Key words: metallurgical waste, briquettes, entropy, entropy change, component, adjacency matrix.

Дата надходження статті: 27.07.2025

Дата прийняття статті: 28.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 544.076.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/25>

Букет О.І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бутенко О.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УСУНЕННЯ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОХІМІЧНІЙ СИСТЕМІ СЕНСОРА РОЗЧИНЕНОГО У ВОДІ КИСНЮ

У статті розглянуто причини виникнення коливальних процесів, пов'язаних з катодним відновленням кисню у водному середовищі на робочому електроді двоелектродного сенсора цього газу. Показано, що регулярні коливальні зміни швидкості відновлення розчиненого у воді кисню виникають як наслідок спроби збільшити величину струмового сигналу сенсора за рахунок збільшення довжини робочого електрода в напрямку ходу потоку аналізованого водного середовища, низька електропровідність якого викликає автоматичний поділ поверхні робочого електрода на зони зі мінною поляризацією. Запропоновано найпростіше рішення названої проблеми – зміна форми і конструкції електрода в бік скорочення його довжини по ходу потоку аналізованого водного середовища. Існує проблема в простих в експлуатації та дешевих сенсорах кисню для аналізу вмісту цього газу у водному середовищі. Не зважаючи на поширеність та відносно хорошу дослідженість реакції катодного відновлення кисню, складність її механізму та широке розмаїття умов перебігу до сьогодні створюють проблеми при проектуванні у тому числі засобів моніторингу концентрації цього газу у природних та технологічних середовищах.

Методом є добре відома хроноамперометрія при постійному потенціалі робочого електрода дво- або триелектродної електрохімічної комірки для катодного відновлення кисню.

Відомо, що амперометричні сенсори кисню за постійного потенціалу робочого електрода генерують стабільний аналітичний струмовий сигнал, величина якого його тим більша, а похибка реєстрації тим менша, чим цей сигнал вищий, що спонукає за незмінної каталітичної активності застосованого каталізатора збільшувати площу цього електрода. За умови застосування примусового пробо- відбору з допомогою насосу (наприклад, на основі крильчатої турбінки, який відрізняється високою стабільністю параметрів та відсутністю випадкових пульсацій витрат створюваного потоку води), найбільш проста й зручна конструкція робочого електрода – навитий у вигляді пружинки навколо і вздовж протяжного анода (допоміжного електрода). Тому збільшення його площі автоматично тягло за собою збільшення його довжини по ходу потоку аналізованого середовища. При цьому виникла проблема регулярних, часто синусоїдальних коливань струмового сигналу в умовах, за яких сенсор мав генерувати стабільний і незмінний аналітичний сигнал після завершення перехідних процесів встановлення його достовірного значення.

У роботі використано метод хроноамперометрії з контрольованим постійним потенціалом робочого електрода двоелектродної комірки, який задається по відношенню до малополяризованого допоміжного електрода, що відіграє одночасно роль електрода порівняння. За умов малоелектропровідного середовища питної або природної води такий підхід усуває потребу в застосуванні капіляра Лугіна, оскільки відстань між будь-якою точкою поверхні робочого електрода й найближчою точкою електрода порівняння становить не більше товщини сепаратора – близько 0.1 мм.

© Букет О.І., Бутенко О.С., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Новизна роботи полягає у виявленні коливальних процесів в широко відомій електрохімічній системі, яка є похідною елемента Кларка, а умови застосування самого аналізованого середовища як електроліту відкритої електрохімічної комірки. Практична цінність роботи полягає у встановленні причини виникнення коливань аналітичного струмового сигналу сенсора кисню на основі повністю відкритою електрохімічної системи, які унеможлилювали його використання як засобу вимірювання концентрації кисню у водному середовищі при тому, що за подібних умов відомі аналоги цього сенсора на основі напівзакритих систем без проблем генерують стабільний у часі струмовий сигнал. Запропоновано просте рішення виявленої проблеми шляхом такої зміни конструкції робочого електрода, за якої скорочується його довжина по ходу потоку відібраної на аналіз проби води.

Ключові слова: електрохімічна сенсор кисню, амперометричний тип, водне середовище, колювання струмового сигналу, усунення коливань, геометрія робочого електрода.

Постановка проблеми. Існує потреба у простих і дешевих сенсорах кисню для моніторингу водного середовища на предмет, наприклад, його придатності для дихання підводних організмів або на предмет його потенційної корозійної агресивності внаслідок присутності кисню як активного деполаризатора корозійного процесу. Одним із напрямів спрощення й здешевлення приладів для контролю розчиненого у воді кисню є розробка таких сенсорів кисню, експлуатація яких вимагає якомога простіших вторинних електронних пристроїв з мінімізацією потужності їх електричного живлення, завдяки чому можна зменшити енергоємність і вартість батареї автономного живлення. Очевидно, такі сенсори можуть бути лише гальванічного типу – амперометричні сенсори на основі двоелектродних комірок з витратним допоміжним електродом, що вимагають вторинних електронних пристроїв у вигляді просто мікроамперметра. Проте сенсори на основі напіввідкритих систем, оснащені напівпроникними мембранами, які відділяють внутрішній гомеостаз електрохімічної комірки від аналізованого середовища (типу елемента Кларка), мають один суттєвий недолік – велику температурну залежність швидкості дифузії кисню через напівпроникну мембрану. Внаслідок цього пристрій необхідно оснащувати датчиком температури і процесором для обрахунку температурної поправки на основі даних попереднього калібрування саме даного сенсора.

Мета. Показати можливість створення амперометричного двоелектродного сенсора кисню на основі повністю відкритої електрохімічної системи, електролітом якої є саме аналізоване водне середовище.

Методом є хроноамперометрія при контрольному постійному потенціалі робочого електрода по відношенню до потенціалу допоміжного електрода, який одночасно слугує електродом порівняння. За такої схеми поляризації проблем з паразитним збудженням вимірювальної системи потенціостата не виникало.

Поляризація синусоїдальною напругою з подальшим аналізом спектрів електрохімічного імпедансу успішно застосовується для дослідження слабоелектропровідних середовищ, оскільки її простіше реалізувати, ніж метод поляризаційних кривих, а результати отримують на порядки швидше, ніж у випадку гравіметрії. Проблема становить лише інтерпретація одержаних даних. У роботі розкрито роль індуктивної складової імпедансу як маркера наявності електрохімічного механізму електродних процесів у системі «сталь-неводне середовище», доведено наявність електрохімічної корозії сталі в мінеральній оліві й показано, що її роль росте з підвищенням температури відповідно росту впливу індуктивного зміщення зсуву кута фази електрохімічного імпедансу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Амперометричні сенсори електрохімічної природи широко використовуються у промисловості й серед них особливе місце займають саме сенсори кисню як одного з найважливіших для життя і технологій газу. Родоначалником амперометричних сенсорів є загально відомий елемент Кларка, який є першим сенсором двоелектродного, гальванічного типу, однією з найважливіших переваг якого є простота реєстрації аналітичного струмового сигналу – реалізується просто з допомогою мікроамперметра без додаткових ланцюгів керування електрохімічною коміркою [1]. Простота електронного пристрою реєстрації струмового сигналу та його низьке електроспоживання зумовлені тим, що такі сенсори є по суті малопотужними хімічними джерелами струму, що забезпечує аналітичним пристроям на їх основі високий рівень автономності при мінімально можливих габаритах і вазі застосованої акумуляторної батареї системи електричного живлення.

Проте існуючі сенсори гальванічного безумовно мають і свої недоліки, один з яких є наслідком того, що їх електрохімічна система є по суті напіввідкритою – її гомеостаз забез-

печується у тому числі використанням напівпроникних мембран, які не пропускають воду у вигляді рідкої та широкий спектр високомолекулярних сполук і гідратованих іонів з високим координаційним числом, а пропускають речовини з відносно невеликими молекулами, такими як кисень. Часто такі мембрани не пропускають нічого крупнішого за молекулу води в газовій її фазі. Це безумовно сприяє як стабільності гомеостазу системи сенсора, так і простоті забезпечення його функціонування через можливість використання у системі електролітів з високою електропровідністю.

Недоліком напівпроникних мембрани є дуже висока температурна залежність швидкості дифузії кисню через їх товщу, що змушує вводити у вимірювальний пристрій систему контролю температури аналізованого середовища та процесор для обрахунку температурної похибки на основі попередньо одержаних даних калібрування застосованого сенсора кисню, що у значній мірі зводить нанівець всі його переваги.

Простим і очевидним підходом до вирішення названої проблеми здається перехід до повністю відкритих електрохімічних систем, у яких роль електроліту вочевидь буде відігравати саме аналізоване водне середовище. Негативний вплив його низької електропровідності можна частково нівелювати мінімізацією міжелектродної відстані застосуванням тонких сепараторів. Проте лишається проблема потрапляння продуктів реакцій на електродах в аналізоване природне чи технологічне середовище.

Хоча попередні дослідження і показали, що виявити продукти окиснення свинцевого анода в аналізоване середовище при застосування сенсора з напіввідкритою системою неможливо сучасними методами [2], застосування свинцю є маркетинговим мінусом такої системи. Окрім цього, відкрита система має збільшити швидкість дифузії іонів свинцю в аналізоване середовище. Тому для такого випадку краще використовувати мідний анод [3], недоліки якого можна усунути триелектродною схемою з додатковим цинковим електродом, застосування якого не передбачає ускладнення електронної схеми вимірювання [4].

Постановка завдання. Метою є демонстрація можливості застосування повністю відкритих електрохімічних систем в гальванічних сенсорах розчиненого у воді кисню для реалізації всіх її переваг з точки зору спрощення системи реєстрації аналітичного струмового сигналу за умови мінімізації її енергоспоживання й відповідно

подовження тривалості автономного функціонування портативних аналітичних пристроїв.

Досягнення поставленої мети реалізується застосуванням відкритої електрохімічної двоелектродної системи. Показано, що виявлені проблеми з її експлуатацією, пов'язані зі складністю кінетики струмоутворюючої реакції та перехідних процесів, можуть бути усунені зміною конструкції (геометрії) робочого електрода.

Виклад основного матеріалу. Досліди проводили на відкритих електрохімічних комірках, за системою і конструкцією подібних до застосованих у роботі [4], але без будь-яких мембран, що відділяють внутрішнє середовище сенсора від аналізованого водного потоку. Допоміжний електрод виготовляли у вигляді циліндра діаметром 3 мм і довжиною від 10 мм до 50 мм. Матеріал анода – свинець, оскільки це спрощує методику виготовлення та експериментів, а даний сенсор є дослдною системою для вивчення функціонування робочого електрода, а не екологічної безпеки системи в цілому. Анод огортали пористим гідрофільним сепаратором товщиною до 0.1 мм поверх якого навивали робочий електрод зі срібного або платинового дроту товщиною 0.1 мм.

Одержаний сенсор розмішували у полімерній трубці, через яку турбінним насосом прокачували воду з ємності з відкритим дзеркалом поверхні площею 6 дм². За літературними даними, такої поверхні достатньо для поновлення концентрації кисню завдяки його поглинанню з атмосфери в умовах витрат на електрохімічну реакцію повільніше за 1 мА.

Застосовували воду з природного ставка, яка пройшла видалення мікрофлори і фауни методом фільтрування.

Вимірювання проводили імпедансметром VersaSTAT 3 АМЕТЕК у режимі хроноамперометрії з контрольованим постійним потенціалом.

Результати реєстрації сигналу сенсора на прокачування аналізованого водного середовища, наведені на рис. 1, демонструють неприємний для майбутнього сенсора недолік: стабільний сигнал відсутній принципово. Замість очікуваного стабільного струмового після завершення перехідного процесу росту негативного катодного струму надалі спостерігається його коливальна зміна у часі.

Цей коливальний процес відновлювався при будь-яких режимах ведення експерименту не залежно від температури і швидкості прокачування аналізованого водного середовища. Аналіз роботи насоса, його заміна, застосування стабілі-

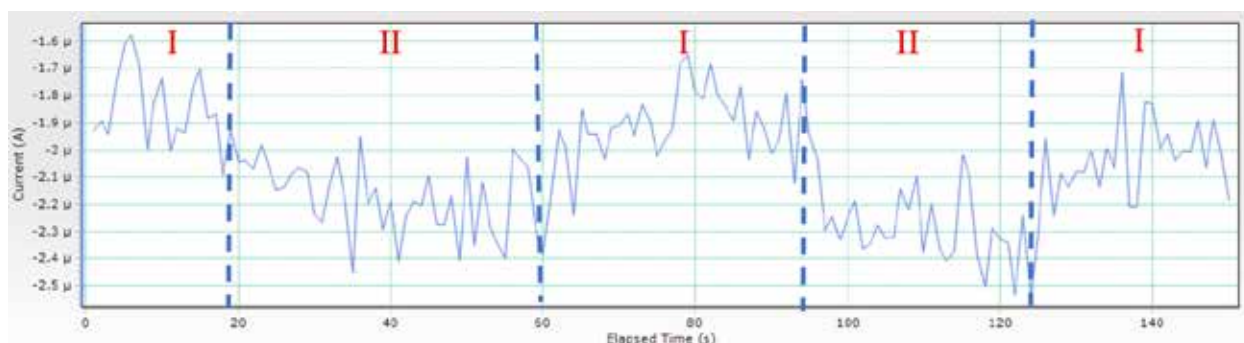


Рис. 1. Перехідна хроноамперометрична характеристика відкритого сенсора кисню у потоці природної води. Довжина срібного робочого електрода по ходу потоку – 20 мм. Потенціал робочого електрода рівний потенціалу корозії свинцю у даному середовищі. I – насос відключений. II – стабільний у часі потік води 2.0 л/год

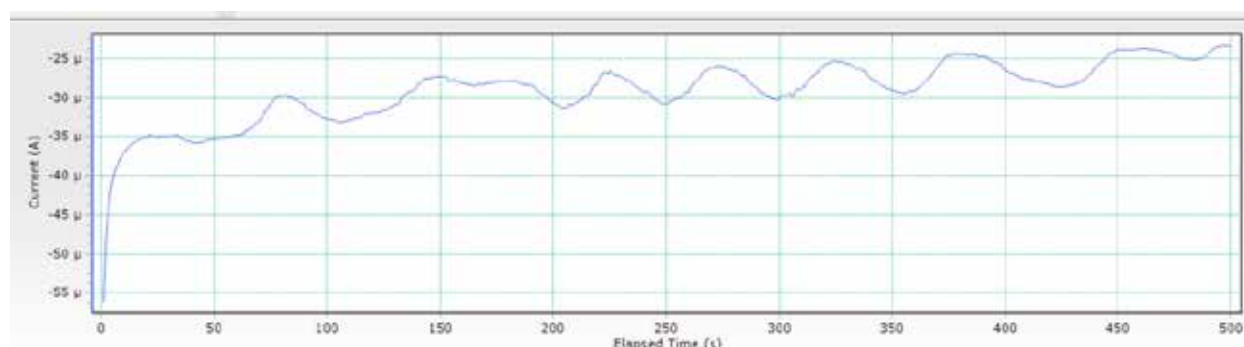


Рис. 2. Перехідна хроноамперометрична характеристика відкритого сенсора кисню поляризованого у потоці природної води з 0.1 M NaCl. Довжина срібного робочого електрода по ходу потоку – 20 мм. Потенціал робочого електрода рівний потенціалу корозії свинцю у даному середовищі. Насос працює – потік води 2.0 л/год

затворів його електричного живлення на коливання ніяк не впливали, з чого дійшли висновку, що причиною є особливості функціонування самої електрохімічної системи.

Зробили припущення щодо причин відтворюваних коливань – низька електропровідність водного середовища розділяє протяжний електрод на окремі зони поляризації, на які діє потік води зі змінним окисно-відновним потенціалом. Ці зміни вірогідно викликані ростом рН внаслідок перебігу реакції відновлення кисню, а також появою у потоці перекису водню, оскільки реакція відновлення кисню іде у дві стадії: спочатку кисень відновлюється до перекису водню, а далі – перекис водню відновлюється до води, причому, як відомо, перша стадія йде повільно, а друга швидше.

Збільшення електропровідності розчину введенням 0.1 M хлориду натрію реєстровану картину змінило мало, а більшу концентрацію не вводили, що не викликати висолювання кисню з води (рис. 2).

Як видно з рис. 2, після замикання електродів на потенціостат та початку поляризації, розміще-

ний у потоці сенсор генерує катодний струм, який зменшується у часі внаслідок відновлення запасу кисню, адсорбованого на поверхні срібла, але стабільного постійного сигналу не встановлюється. Спостерігається його синусоїдальна зміна, хоча й регулярна і добре відтворювана, порівняно з дослідом з рис. 1 у природній воді нижчої електропровідності.

Збільшити електропровідність додатково, а також стабілізувати рН можна додаванням 0.05M H₂SO₄ (рис. 3). Це дозволило у порівнянні з повністю аналогічним дослідом з рис. 2 подавити регулярні коливання на перші 200 с експерименту.

Одержані результати дозволили дійти висновку, що причиною коливань однозначно є поділ електрода по довжині по ходу потоку на зони з різним за потенціалом окисно-відновним середовищем. Тому найпростішим способом усунення коливань має бути скорочення довжини електрода по ходу потоку. Робочий електрод було скорочено до 5 мм. У такий спосіб, як видно з рис. 4, вдалося подавити коливальні процеси, проте загальна

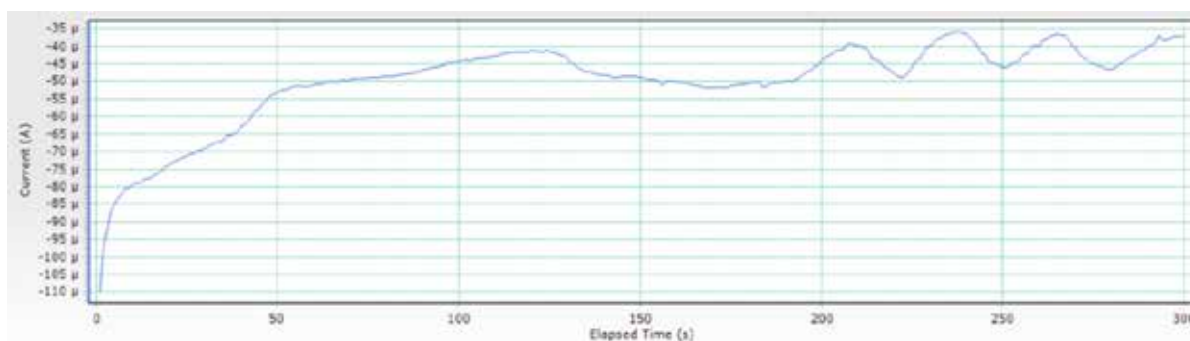


Рис. 3. Перехідна хроноамперометрична характеристика відкритого сенсора кисню поляризованого у потоці природної води з $0.05 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Довжина срібного робочого електрода по ходу потоку – 20 мм. Потенціал робочого електрода рівний потенціалу корозії свинцю у даному середовищі. Насос працює – потік води 2.0 л/год

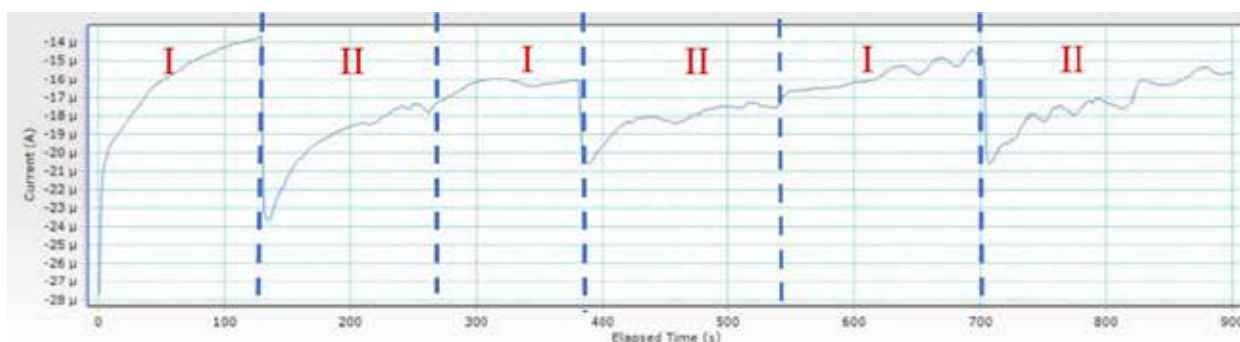


Рис. 4. Перехідна хроноамперометрична характеристика відкритого сенсора кисню поляризованого у потоці природної води. Довжина срібного робочого електрода по ходу потоку – 5 мм. Потенціал робочого електрода рівний потенціалу корозії свинцю у даному середовищі. I – насос відключений. II – стабільний у часі потік води 2.0 л/год

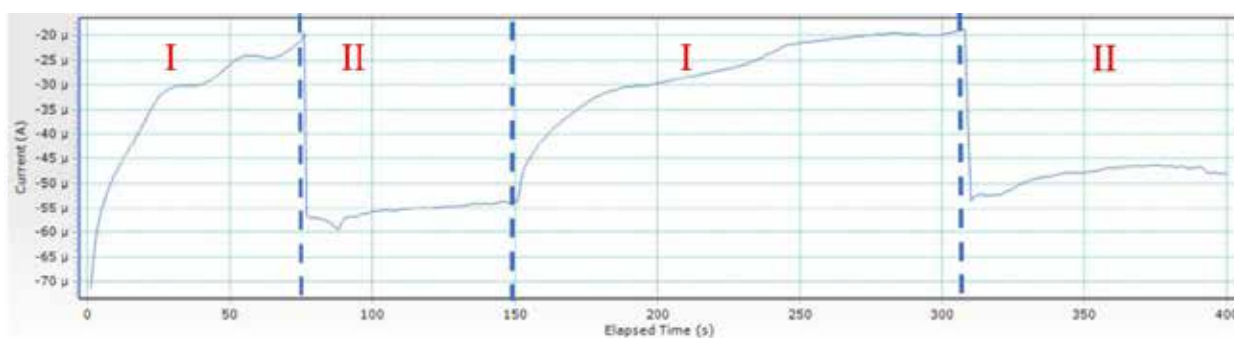


Рис. 5. Перехідна хроноамперометрична характеристика відкритого сенсора кисню поляризованого у потоці природної води з добавкою $0.05 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Довжина срібного робочого електрода по ходу потоку – 5 мм. Потенціал робочого електрода рівний потенціалу корозії свинцю у даному середовищі. I – насос відключений. II – стабільний у часі потік води 2.0 л/год

перехідна характеристика електрода погіршилася, оскільки катодний сигнал почав «завалюватися».

Подальше збільшення електропровідності та стабілізація рН введенням $0.05 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ практично ліквідує коливальні процеси й стабілізує відтворення перехідної характеристики в цілому (рис. 5).

Таким чином, скорочення довжини електрода по ходу потоку аналізованої води лише у 4 рази практично повністю ліквідувало коливальні про-

цеси. Проте додавати сторонні електроліти у систему вимірювання вмісту кисню у природній воді для стабілізації перехідної характеристики – це абсолютно недоречно в умовах практичної експлуатації аналітичного пристрою. Тому для стабілізації функціонування електрохімічної системи сенсора електрод скоротили до 4 мм по ходу потоку води, а каталізатор замінили на платину, яка відрізняється суттєво вищою каталітичною

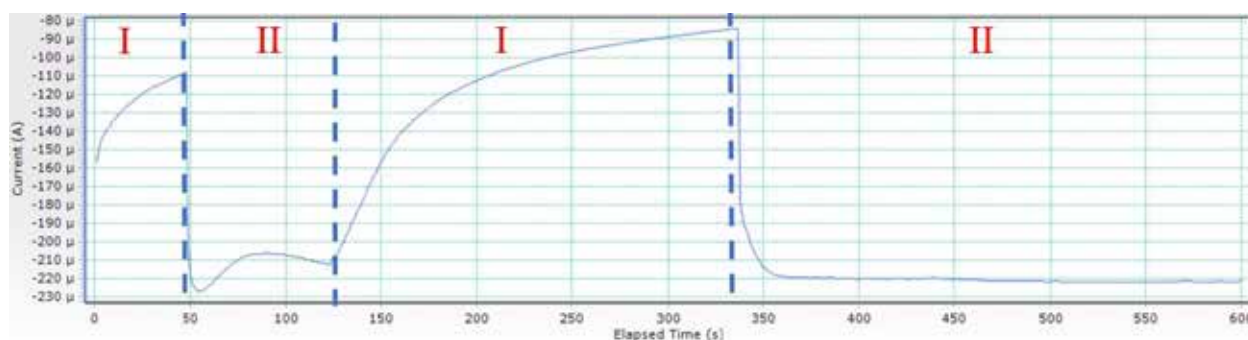


Рис. 6. Перехідна хроноамперометрична характеристика відкритого сенсора кисню поляризованого у потоці природної води. Довжина платинового робочого електрода по ходу потоку – 4 мм. Потенціал робочого електрода рівний потенціалу корозії свинцю у даному середовищі.
I – насос відключений. II – стабільний у часі потік води 2.0 л/год

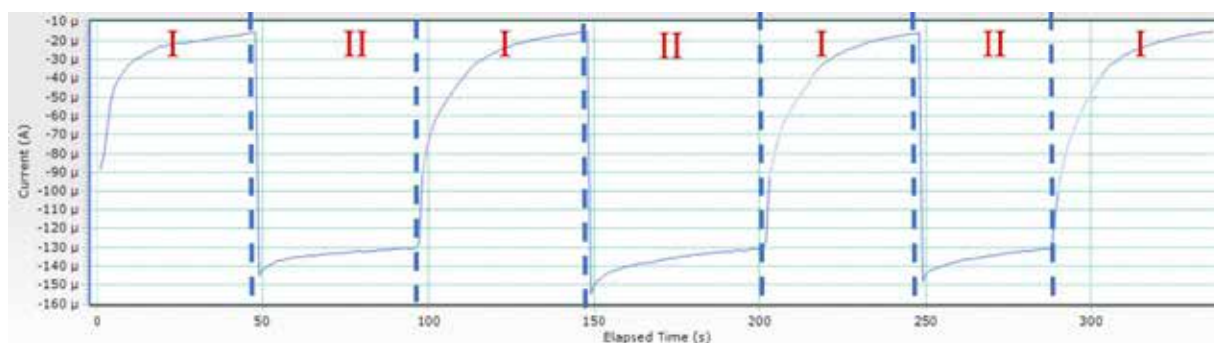


Рис. 7. Перехідна хроноамперометрична характеристика відкритого сенсора кисню поляризованого у потоці природної води. Довжина платинового робочого електрода по ходу потоку – 2 мм. Потенціал робочого електрода рівний потенціалу корозії свинцю у даному середовищі.
I – насос відключений. II – стабільний у часі потік води 2.0 л/год

активністю по відношенню до реакції відновлення кисню. Результат, поданий на рис. 6, демонструє у природній воді майже повну відсутність коливань струмового сигналу.

Подальше скорочення довжини робочого електрода до 2 мм повністю стабілізує перехідну характеристику сенсора (рис. 7).

Це дає надію досягти повної стабілізації функціонування значно дешевшого срібного електрода лише за рахунок вдосконалення його геометрії по відношенню до потоку аналізованого водного середовища.

Висновки. Спроба переходу на повністю відкриту електрохімічну систему сенсора кисню

наштовхнулася на коливальну зміну струмового сигналу у часі, що унеможливило вимірювання. Встановлено, що причиною коливань є розділення протяжного робочого електрода на зони з різним значенням окисно-відновного потенціалу аналізованого середовища внаслідок низьких його електропровідності та буферної ємності. Повністю усунути це негативне для амперометричного сенсора явище можна за рахунок вдосконалення геометрії й розміщення робочого електрода по відношенню до вектору руху аналізованого середовища, наприклад, шляхом багатократного скорочення довжини електрода по ходу потоку води.

Список літератури:

1. Чвірук В.П., Поляков С.Г., Герасименко Ю.С. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ: монографія. – К.: Академперіодика, 2007. – 324 с. ISBN: 978-966-360-067-3.
2. Лабзова О.О., Букет О.І., Бутенко О.С. Екологічна безпека свинцевого анода сенсора розчиненого у воді кисню // The XIV International Scientific and Practical Conference «Prospects for the development of science and the environment». – 10 April 2023. – Helsinki, Finland. – 415 p. – P. 65-66. ISBN – 9-789-40368-863-3.
3. Buket O.I., Vashchenko O.M. Copper as a replacement of lead as an anodic material of galvanic oxygen sensor // Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry – 2019 : Monograph / editor-in-chief V. Z. Barsukov. Kyiv: KNUTD, 2019 – 285 p. – P. 152-160. ISBN 978-617-7506-48-4.

4. Лінійчева О. В., Бутенко О.С. ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИЙ СЕНСОР РОЗЧИНЕНОГО У ВОДІ КИСНЮ З ДОДАТКОВИМ ЦИНКОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ ДЛЯ ПОНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ МІДНОГО АНОДА «Вісник Херсонського національного технічного університету» для розміщення у № 1 2025 року. УДК 543.37: 544.076.2.

Buket O.I., Butenko O.S. ELIMINATION OF OSCILLATORY PROCESSES IN THE ELECTROCHEMICAL SYSTEM OF A SENSOR FOR OXYGEN DISSOLVED IN WATER

The article discusses the causes of oscillatory processes associated with cathodic reduction of oxygen in an aqueous medium on the working electrode of a two-electrode sensor for this gas. It is shown that regular oscillatory changes in the rate of reduction of oxygen dissolved in water occur as a result of an attempt to increase the current signal of the sensor by increasing the length of the working electrode in the direction of the flow of the analysed aqueous medium, whose low electrical conductivity causes the surface of the working electrode to automatically divide into zones with variable polarisation. The simplest solution to this problem is proposed – changing the shape and design of the electrode to reduce its length in the direction of the flow of the analysed aqueous medium. There is a need for simple-to-use and inexpensive oxygen sensors for analysing the content of this gas in an aqueous medium. Despite the prevalence and relatively good research of the cathodic reduction of oxygen, the complexity of its mechanism and the wide variety of conditions still pose problems in the design of means for monitoring the concentration of this gas in natural and technological environments.

The method is well-known chronoamperometry at a constant potential of the working electrode of a two- or three-electrode electrochemical cell for cathodic oxygen reduction.

It is known that amperometric oxygen sensors at a constant working electrode potential generate a stable analytical current signal, the value of which is greater and the registration error is smaller, the higher this signal is, which encourages an increase in the area of this electrode with unchanged catalytic activity of the catalyst used. When using forced sampling with a pump (for example, based on an impeller turbine, which is characterised by high stability of parameters and the absence of random pulsations in the flow rate of the water flow created), the simplest and most convenient design of the working electrode is wound in the form of a spring around and along the extended anode (auxiliary electrode). Therefore, increasing its area automatically entails increasing its length along the flow of the analysed medium. This led to the problem of regular, often sinusoidal oscillations of the current signal in conditions where the sensor had to generate a stable and constant analytical signal after the completion of the transient processes of establishing its reliable value.

The work uses the chronoamperometry method with a controlled constant potential of the working electrode of a two-electrode cell, which is set in relation to a low-polarised auxiliary electrode, which simultaneously acts as a reference electrode. Under the conditions of a low-conductivity environment of drinking or natural water, this approach eliminates the need to use a Lugin capillary, since the distance between any point on the surface of the working electrode and the nearest point of the reference electrode is no more than the thickness of the separator – about 0.1 mm.

The novelty of the work lies in the detection of oscillatory processes in a well-known electrochemical system, which is a derivative of the Clark cell, and the conditions for using the analysed medium itself as the electrolyte of an open electrochemical cell. The practical value of the work lies in establishing the cause of oscillations in the analytical current signal of an oxygen sensor based on a completely open electrochemical system, which made it impossible to use it as a means of measuring oxygen concentration in an aqueous medium, given that under similar conditions, known analogues of this sensor based on semi-closed systems generate a stable current signal over time without any problems. A simple solution to the identified problem is proposed by changing the design of the working electrode in such a way that its length along the flow of the water sample selected for analysis is reduced.

Key words: electrochemical oxygen sensor; amperometric type, aqueous environment, current signal fluctuations, elimination of fluctuations, working electrode geometry.

Дата надходження статті: 30.07.2025

Дата прийняття статті: 08.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Коваль М.Г.

Черкаський державний технологічний університет

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ФАРБУВАЛЬНО-ОПОРЯДЖУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Захист води від забруднення – одне з найважливіших світових завдань, а ефективне і економічне використання води в промисловості має бути одним із пріоритетів нашої держави. Вода потрібна для роботи різних галузей промисловості. Текстильна промисловість споживає велику кількість води і виробляє величезну кількість стічних вод, які у своєму складі містять велику кількість текстильних барвників, мийних засобів та інших хімічних речовин, і мають негативний вплив на загальну екосистему. Злив неочищених промислових стічних вод у водойми призводить до забруднення водойм та ґрунту, загрожує біорізноманіттю та здоров'ю людини. Актуальною є проблема очищення промислових стічних вод, що є не тільки турботою про навколишнє середовище, а й важливим фактором для сталого розвитку та економіки країни.

Стаття присвячена основним проблемам, які є в секторі стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва текстильної промисловості, розглянуто сучасні шляхи вирішення цих проблем. Використовуючи методи аналізу й узагальнення даних наукової вітчизняної та зарубіжної літератури вивчено існуючі сучасні методи очищення промислових стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва, що набули б широкого застосування у водопідготовці.

Існуючі традиційні методи очищення стічних вод (механічні, біологічні та хімічні), які не можуть бути визнаними найкращими, оскільки кожен з них має свої переваги та обмеження щодо вартості, ефективності, технологічного виконання, впливу на навколишнє середовище. У статті розглянуто сучасні новітні технології та інноваційні підходи, які дозволяють ефективніше видаляти хімічні забруднення стічних вод текстильної галузі і забезпечувати повторне використання водних ресурсів, що забезпечує й економічну ефективність процесу очищення. До таких методів належать: біоремедіація; використання біореакторів, мікробних паливних елементів; генна інженерія; використання бактерій, грибів, дріжджів, водоростей та актиноміцетів; використання наноматеріалів; застосування методів ультрафільтрації й нанофільтрації; адсорбційне очищення.

З'ясовано можливість та доцільність застосування сучасних методів рішення проблем в області стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва та поводження з ними в текстильній галузі.

Ключові слова: текстильна промисловість, фарбувально-опоряджувальне виробництво, барвники, стічна вода, очищення.

Постановка проблеми. Проблематика раціонального використання природних ресурсів, екологічної безпеки та охорони навколишнього середовища є надзвичайно актуальною і потребує негайного впливу людини на оптимізацію технологічних процесів, зниження впливу на екосистему.

Незважаючи на зусилля, які уже зараз прикладає людство для покращення стану екосистем, проблема гідросфери з кожним роком загострюється і вже сьогодні ми маємо обмежені запаси прісної води. До 2030 року приблизно 47% населення світу зіткнеться з проблемою дефіциту чистої води [1]. Основною причиною цієї ситуа-

ції є стрімка індустріалізація, що призводить до стрімкого зростання кількості підприємств та нераціонального використання природних ресурсів. Відповідно до Стратегії розвитку водної політики України на 2020–2050 рр [2], частка забруднених та недостатньо очищених стічних вод (СВ) відносно загального обсягу водовідведення зворотних вод у 2020 році склала 10%. Щороку зі СВ до водних об'єктів скидається біля 2 млн. тонн забруднюючих речовин, що призводить до інтенсивної евтрофікації водойм.

У текстильній та паперовій промисловості масово використовуються барвники, зокрема у текстильній промисловості використовується

понад 10000 різних барвників і пігментів [1], наявність у структурі молекул яких хромофорних груп $-N=N-$, $O=C-NH-$, $-CH=N-$ надає цим молекулам токсичності та канцерогенності [3].

Фарбувально-опоряджувальне виробництво текстильної промисловості – це джерело величезної кількості стічних вод, забруднених текстильними барвниками, синтетичними мийними засобами та іншими забруднюючими хімічними речовинами. Одним з останніх етапів процесу фарбування текстилю є цикл прання, який служить як для закріплення кольору в тканині, так і для усунення будь-яких надлишків кольору. Після завершення циклу фарбування тканин забруднена вода та пігменти разом із мийними засобами скидаються у джерела поверхневих вод [3]. Злив неочищених промислових стічних вод у водойми призводить до забруднення водойм та ґрунту, загрожує біорізноманіттю та здоров'ю людини.

Тож, очищення промислових стічних вод – це не тільки турбота про навколишнє середовище, а й важливий фактор для сталого розвитку та економіки країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі методи очищення промислових стічних вод текстильної галузі можна розділити на три основні категорії: біологічні, хімічні та фізичні. Маючи складну хімічну структуру, барвники мають високу стійкість до розкладання, тому за нормальних умов вони стійкі до світла, тепла і дії окисників [4].

Через низьку здатність барвників до біологічного розкладання традиційний процес біологічного очищення стічних вод не дуже ефективний при очищенні стічних вод, що містять барвник. У цій ситуації, як правило, використовуються фізичні та хімічні процеси очищення [5].

Біологічні методи включають аеробну, анаеробну деградацію, тоді як хімічні методи включають коагуляцію, електрокоагуляцію та звичайні методи окислення за допомогою окислювачів, таких як озон, опромінення або електрохімічні процеси [6]. Адсорбція, окислення, біологічне очищення, електрохімічна обробка та мембранна фільтрація є одними з важливих методів, які використовуються для видалення барвника. Жоден метод не може бути визнаний найкращою доступною технологією, оскільки кожен з них має свої переваги та обмеження щодо вартості, ефективності, технологічного виконання, впливу на навколишнє середовище. У зв'язку зі складним характером отриманих стоків з різних тех-

нологічних процесів жодна автономна техніка не змогла продемонструвати задовільне очищення стічних вод [7].

Постановка завдання. Метою статті є вивчення існуючих сучасних методів очищення промислових стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва, що набули б широкого застосування у водопідготовці.

Дослідження проводили з використанням методів аналізу й узагальнення даних наукової літератури.

Виклад основного матеріалу. Сучасні виклики, пов'язані з якістю води та її ресурсами, вимагають від суспільства впровадження новаторських підходів до очищення стічних вод. Традиційні методи очищення води: механічна, біологічна та хімічна обробка, можуть не забезпечувати достатнього рівня очищення, особливо при наявності складних забруднювачів (барвників, пігментів). Сучасні технології пропонують інноваційні підходи, які дозволяють ефективніше видаляти хімічні забруднення і забезпечувати повторне використання водних ресурсів, що забезпечує й економічну ефективність процесу очищення.

Тому науковці активно працюють над розробкою та впровадженням нових технологій, які дозволили б досягати високих результатів у цій сфері. Серед основних успіхів останніх років можна виділити не лише вдосконалення традиційних методів, але й появу інноваційних рішень, які базуються на використанні біоінженерії, нанотехнологій та електрохімічних процесів [8].

Серед основних тенденцій в цій галузі можна виділити впровадження розумних систем моніторингу, які дозволяють в реальному часі оцінювати ефективність очищення. Інноваційні рішення, такі як використання наноматеріалів та біосенсорів, відкривають нові горизонти для покращення якості очищення стічних вод, що дозволяє не лише підвищувати ефективність цих процесів, а й дозволяє повторно використовувати очищену воду. Автоматизація процесів щодо використання сучасних ІТ-рішень для моніторингу та управління системами очищення підвищує екологічність та мінімізує вплив на навколишнє середовище [8].

У даний час при очищенні стічної води від барвників застосовуються передові технології, такі як біоре mediaція, біореактори, мікробні паливні елементи, генна інженерія та інші.

Безпечним методом детоксикації барвників зі стічних вод є технологія біоре mediaції (ферментативний метод) з використанням мікроорга-

нізмів або рослин. Для знебарвлення барвників у стічних водах ефективною стратегією служить бактеріальна обробка [9]. Біоремедіація за допомогою ензимів є сприятливою, екологічно чистою методикою [10]. Метод ферментативної деградації полягає у знаходженні властивостей мікробів та розробці ферментів для метаболізму барвників і перетворенні шкідливої форми барвників у нешкідливі або нетоксичні форми [10]. Клас ферментів, азоредуктаза, був описаний у роботі [11] як такий, що проводить реакцію відновлення і викликає розпад азозв'язків ($-N=N-$), присутніх у барвниках, перетворюючи ароматичний амін у безбарвну воду. У біодеградації текстильних барвників можуть брати участь і ферменти, що продукуються різними типами грибів, такими як лігнінпероксидази, азоредуктази, лаккази з грибів білої гнилі [12].

До сучасних методів знебарвлення стічних вод, що містять барвники, належать використання бактерій, грибів, дріжджів, водоростей та актиноміцетів. З біотехнологічної точки зору, бактерії мають багато переваг, оскільки вони містять велику кількість деградуючих ферментів, отже, мають здатність розкласти барвники широкого спектру [13, 14]. Основною перевагою роботи з бактеріями є їх ефективність у швидкому зростанні та здатність легко культивуватися. Органічні забруднювачі на основі вуглеводнів, можуть катаболізуватися бактеріями як джерело енергії [15]. Бактерії також мають здатність окислювати текстильні барвники із вмістом Сульфуру до H_2SO_4 [16].

Мікроорганізми, зокрема актиноміцети, відіграють значну роль у знебарвленні барвників. Кілька дослідників повідомляли про знебарвлення барвників за допомогою актиноміцетів. Дослідники Zhou і Zimmermann [17] спостерігали знебарвлення барвників видами *Streptomyces* на 3–10%, а вчені Dong et al. [18] спостерігали 99% знебарвлення барвників за допомогою *Streptomyces* sp. S27.

Дослідження показують, що азобарвники використовуються як джерело вуглецю та енергії для водоростей, які потім розпадаються на ароматичні аміни, згодом перетворюючись на прості неорганічні та органічні сполуки [19]. Для дослідження знебарвлення барвників із зразків текстильних стічних вод широко використовуються види *Chlorella*, виду *Oscillatoria*, *Phormidium* та *Synechocystis* [20].

Використання нанотехнологій для обробки барвників є найновішим перспективним підходом. В останні роки нанобіоремедіація з'явилася

як життєздатна альтернатива для ефективного та екологічно чистого видалення барвників з навколишнього середовища [21]. Численні галузі, включаючи сільське господарство, енергетику, медицину та навколишнє середовище, використовують нанотехнології [22, 23]. Розробка наночастинок екологічно чистими мікробами корисна для нано-біоремедіації забруднювачів. Наночастинки (НЧ) мають відмінні структурні властивості, які роблять їх привабливими для очищення текстильних стічних вод. Ці НЧ діють як адсорбенти для успішного видалення барвників. У своєму дослідженні Balrabe et al. [21] повідомили, що еозин жовтуватий продемонстрував ефективне видалення (95%) при 75 ppm з використанням наночастинок Fe_2O_3 , рН 6, з часом експозиції 15 хв. Рані і Шанкер [24] повідомили про використання функціоналізованих наноматеріалів для відновлення органічних барвників. Наноматеріали та наночастинки використовуються для адсорбції та видалення кольорів зі стічних вод. Наночастинки мають розмір від 1 до 100 нм [25]. Дендримери, металовмісні наночастинки, цеоліти та вуглецеві наноматеріали – це чотири типи функціональних наночастинок, які використовуються для очищення стічних вод. Наноматеріали мають величезний потенціал для очищення води та повного видалення існуючих та нових органічних забруднювачів з води та стічних вод. Згідно з дослідженням, найбільш ефективним способом зменшення забруднення барвником з водного середовища є адсорбція наноматеріалами [26]. Адсорбція барвника метиленового синього була максимізована за рахунок використання наночастинок срібла, навантажених на активоване вугілля. Поглинання барвників можливе наночастинками аргентум магнетиту та хітозану [27]. Порошок нанокремнезему Аргентуму показав адсорбцію барвників Congo red, Eosin Yellow, Bromophenol Blue 2 та Brilliant Blue [28].

Більшість класів барвників можуть бути повністю видалені за допомогою передових методів: ультрафільтрації (UF) та нанофільтрації (NF), хоча необхідно дотримуватися обережності, щоб запобігти забрудненню мембрани, для цього потрібна особлива попередня обробка мембранного процесу [29].

Одним із сучасних методів очищення стічних вод текстильної промисловості є практичне використання електрохімічних методів очищення. Науковці із КНУТД (м. Київ, Україна) за допомогою електролізної установки встановили, що ступень видалення з стічних вод текстильної про-

мисловості певних органічних з'єднань і важких металів на одиницю витраченої на це електричної енергії може залежати як від температури цих стічних вод, так і від питомого струму, який через ці стічні води протікає, що дозволяє збільшити ступень видалення з стічних вод певних органічних з'єднань і важких металів (на одиницю витраченої на це електричної енергії) приблизно на (5–10%) [30].

Практично, комбінація кількох обробок, відома як «гібридний процес», частіше використовується для отримання найефективнішої якості очищеної води та є більш економічним способом [31].

В основі економічно вигідної та високоефективної технології, яка широко використовується для очищення стічних вод, утворених після процесу фарбування текстильних матеріалів, лежить метод адсорбційного очищення.

Активоване вугілля є одним з найбільш широко застосовуваних звичайних адсорбентів завдяки своїм відмінним адсорбційним характеристикам. Однак, його застосування було обмежене високою ціною та складними процесами регенерації. Крім того, звичайне активоване вугілля мало-ефективне і має низьку селективність по відношенню до текстильних дисперсних барвників [32]. Щоб знизити вартість і підвищити ефективність адсорбції, було розроблено багато нових альтернатив для заміни звичайного активованого вугілля. Зокрема, використання цеолітових та бентонітових глин, як природних адсорбентів, набуває широкого використання. Україна багата на поклади цих мінеральних адсорбуючих мате-

ріалів. Адсорбція стічних вод природним цеолітом Закарпатського родовища (з подальшою коагуляцією та флокуляцією) набула практичного використання під час очищення стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва реального підприємства ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» (м. Черкаси, Україна). У роботах автори очищують стічну воду до того ступеня очищення, щоб в подальшому використовувати її повторно, як технологічну, в процесі фарбування тканини прямими [33], активними [34] і дисперсними [35] барвниками.

Висновки. Сучасні технології очищення промислових стічних вод відрізняються високою ефективністю, енергоефективністю та екологічністю. Вони мають дозволяти очищати стічні води до високих стандартів з можливістю скидати їх у водойми без загрози забруднення; відрізнятися низьким споживанням енергії та зниженням експлуатаційних витрат; скорочувати викиди забруднюючих речовин в атмосферу та мінімізують вплив на навколишнє середовище. Майбутні дослідження повинні вивчати процеси знебарвлення чистих культур, а також змішаних культур, опосередкованих культурою, в яких мікробні штами повинні бути вдосконалені за допомогою генної інженерії. Необхідні подальші передові дослідження для вивчення шляхів деградації барвника, генетики мікроорганізмів, що знебарвлюють барвник, і застосування останніх стратегій обробки барвників. Також існує потреба у вивченні недорогих стратегій екологічно чистого очищення для сталого довкілля.

Список літератури:

1. Aminul I., Siow H.T., Yun H.T., Chi H.N., Dai-Viet N.V., Mohd L.I., Munjur H., Azizur R K., Alam S.M., Rabiul A. Step towards the sustainable toxic dyes removal and recycling from aqueous solution – A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 175. P. 105–129. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105849.
2. Водна стратегія України на період до 2050 року. Київ, 2022. P. 1–26. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 16.06.2025).
3. Berradi M., Hsissou R., Khudhair M., Assouag M., Cherkaoui O., El Bachiri A., El Harfi A. Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. *Heliyon*. 2019. Vol. 5, № 11. P. 123–158. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02711.
4. Crini G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*. 2006. Vol. 97, № 9. P. 1061–1085. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.001.
5. Nachiyar C.V., Rakshi A.D., Sandhya S.N., Jebasta B.D., Nellore J. Developments in treatment technologies of dye-containing effluent: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023. Vol. 7. P. 100–139. DOI: 10.1016/j.csee.2023.100339.
6. Іванько О.М. Сучасні підходи до очищення стічних вод. *Лікарська справа*. 2013. № 3. С. 102–105. DOI: 10.31640/LS-2013-3-19.
7. Samsami S., Mohamadizani M., Sarrafzadeh M.H., Rene E.R., Firoozbahr M. Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 143. P. 138–163. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.034.

8. Інновації в очищенні стічних вод – досягнення і перспективи. *Ваш майстер: будівництво та ремонт*, 2024. <https://vash-master.com.ua/innovatsijni-texnologii-ochishennya-stichnix-vod-dosyagnennya-perspektivi-ta-novitni-rishennya> (дата звернення: 20.07.2025).
9. Pourbabae A.A., Malakzadeh F., Sarbolouki M.N., Najafi F. Aerobic decolorization and detoxification of disperse dye in textile effluent by a new isolate of *Bacillus* spp. *Biotechnol. Bioeng.* 2006. Vol. 93. P. 631–635. DOI: 10.1002/bit.20732.
10. Bhandari S., Poudel D.K., Marahatha R., Dawadi S., Khadaya K., Phuyal S. Microbial enzymes used in bioremediation. *Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 20. P. 884–921. DOI: 10.1155/2021/8849512.
11. Mendes S., Robalo M.P., Martins L.O. Bacterial Enzymes and Multi-enzymatic Systems for Cleaning-up Dyes from the Environment. In: Singh, S. (eds) *Microbial Degradation of Synthetic Dyes in Wastewaters*. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. 2015. P. 27–55. DOI: 10.1007/978-3-319-10942-8.
12. Lellis B., Polonio C.Z.F., Pamphile J. A., Polonio J. C. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*. 2019. Vol. 3. P. 275–290. DOI: 10.1016/j.biori.2019.09.001.
13. Singh P. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013. P. 138–157. URL: <https://surl.li/czspoc> (дата звернення: 20.07.2025).
14. Khan R., Bhawana P. & Fulekar M.H. Microbial decolorization and degradation of synthetic dyes: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2013. Vol. 12. P. 75–97. DOI: 10.1007/s11157-012-9287-6.
15. Yang H.Y., Jia R.B., Chen B., Li L. Degradation of recalcitrant aliphatic and aromatic hydrocarbons by a dioxin- degrader *Rhodococcus* sp. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2014. Vol. 21, № 18. P. 11086–11093. DOI: 10.1007/s11356-014-3027-0.
16. Nguyen T.A., Fu C.C., Juang R.S. Biosorption and biodegradation of a sulphur dye in high-strength dyeing wastewater by *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 182. P. 182:265–271. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.083.
17. Zhou W., Zimmermann W. Decolorization of industrial effluents containing reactive dyes by actinomycetes. *FEMS Microbiology Letters*. 1993. Vol. 107. P. 157–161. DOI: 10.1111/j.1574-6968.1993.tb06023.x.
18. Dong H., Guo T., Zhang W., Ying H., Wang P., Wang Y., Chen Y. Biochemical characterization of a novel azo-reductase from *Streptomyces* sp. application in eco-friendly decolorization of azo-dyes wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 140. P. 1037–1046. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.196.
19. Jamee R., Siddique R. Biodegradation of synthetic dyes of textile effluent by micro-organisms: An environmentally and economically sustainable approach. *European journal of microbiology & immunology*. 2019. Vol. 9. P. 114–118. DOI: 10.1556/1886.2019.00018.
20. Gangola S., Bhatt P., Chaudhary P., Khatri P., Kumar N., Sharma A. Microbial Biotechnology in Environmental Monitoring and Cleanup. IGI Global; Hershey, PA, USA: 2018. P. 1–27.
21. Balrabe Y.B., Oumarou I.N.M., Korony S.A., Adjama I., Baraze I.R.A. Photooxidation of organic dye by Fe_2O_3 nanoparticles; catalyst, electron acceptor and polyurethane membrane effects. *Journal of Nanotechnology*. 2023. P. 129–176. DOI: 10.1155/2023/1292762.
22. Garg D., Sridhar K., Stephen Inbaraj B., Chawla P., Tripathi M., Sharma M. Nano-biofertilizer formulations for agriculture: A systematic review on recent advances and prospective applications. *Bioengineering*. 2023. Vol. 10, № 9. P. 1010–1034. DOI: 10.3390/bioengineering10091010.
23. Bala S., Sharma M., Dashora K., Siddiqui S., Diwan D., Tripathi M. Nanomaterials based sustainable bioenergy production systems: Current trends and future prospects. *Nanofabrication*. 2022. Vol. 7. P. 314–324. DOI: 10.37819/nanofab.007.253.
24. Rani M., Shanker U. Removal of organic dyes by functionalized nanomaterials. In: Shanker U., Hussain C.M., Rani M., editors. *Handbook of Green and Sustainable Nanotechnology*. Springer; Cham, Switzerland: 2023. P. 1267–1298.
25. Shih Y.H., Tso C.P., Tung L.Y. Rapid degradation of methyl orange with nanoscale zerovalent iron particles. *Sustainable Environment Research*. 2010. Vol. 20, № 3. P. 137–143.
26. Osagie C., Othmani A., Ghosh S., Malloum A., Kashitarash E. Z., Ahmadi S. Dyes adsorption from aqueous media through the nanotechnology: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 14. P. 2195–2218. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.085.
27. Marimuthu S., et al. Silver nanoparticles in dye effluent treatment: a review on synthesis, treatment methods, mechanisms, photocatalytic degradation, toxic effects and mitigation of toxicity. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2020. Vol. 205. P. 111–123. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2020.111823.
28. Roy M., Saha R. Dyes and their removal technologies from wastewater: A critical review. *Intelligent Environmental Data Monitoring for Pollution Management*. 2021. P. 127–160. DOI: 10.1016/B978-0-12-819671-7.00006-3.

29. Samhaber W.M., Nguyen M.T. Applicability and costs of nanofiltration in combination with photocatalysis for the treatment of dye house effluents. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2014. Vol. 5, № 1. P. 476–484. DOI: 10.3762/bjnano.5.55
30. Лісовець С. М., Томашевський Д. І. Підвищення ефективності очищення стічних вод за допомогою електролізної установки. *Технології та дизайн*. 2018. Вип. 4, № 29. С. 1–7. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/10880> (дата звернення: 21.07.2025).
31. Al-Tohamy R, Ali S.S., Li F., Okasha K.M., Yehia A.-G. M., Elsamahy T., Jiao H., Fu Y., Sun J. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022. Vol. 231. P. 113–160. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.113160.
32. Zhou Y., Lu J., Zhou Y., Liu Y. Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 252, Part A. P. 352–365. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.05.072.
33. Коваль М.Г. Дослідження фарбування бавовняних тканин прямими барвниками із повторним використанням очищених стічних вод. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 1, том 36 (75). С. 180–188. DOI: 10.32782/2663-5941/2025.1.1/26.
34. Koval M.G. Development of resource-saving technology of dyeing cotton fabrics by reactive dyes with reuse of treated wastewater from dyeing and finishing production and creation of a basic technological scheme. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. Vol. 32, № 3. P. 669–680. DOI: 10.15421/jchemtech.v32i3.299509.
35. Koval M. Repeated Use of Purified Wastewater in the Dyeing of Polyether Fabrics with Dispersed Dyes. *French-Ukrainian journal of chemistry*. 2024. Vol. 12, № 01. P. 118–138. DOI: 10.17721/fujcV12I1P118-138.

Koval M.G. MODERN APPROACHES TO WASTEWATER TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY DYEING AND FINISHING PRODUCTION

Protecting water from pollution is one of the most important global challenges, and the efficient and economical use of water in industry should be one of our country's priorities. Water is needed for various industries to operate. The textile industry consumes large amounts of water and produces huge amounts of wastewater, which contains large amounts of textile dyes, detergents and other chemicals and has a negative impact on the overall ecosystem. The discharge of untreated industrial wastewater into water bodies leads to the pollution of water bodies and soil, threatening biodiversity and human health. The problem of industrial wastewater treatment is relevant, which is not only a concern for the environment, but also an important factor for the sustainable development and economy of the country.

The article is devoted to the main problems in the wastewater sector of the dyeing and finishing production of the textile industry, and modern ways of solving these problems are considered. Methods of analysis and generalisation of data from domestic and foreign scientific literature were used. We looked into the current ways to clean industrial wastewater from dyeing and finishing production that could be widely used in water treatment.

Existing traditional methods of wastewater treatment (mechanical, biological and chemical) cannot be considered the best, since each of them has its own advantages and limitations in terms of cost, efficiency, technological implementation and environmental impact. This article and paper looks at the latest tech and innovative ways to get rid of chemical pollution in wastewater from the textile industry more efficiently and make sure water resources can be reused, which also makes the cleaning process more cost-effective. These methods include: bioremediation; the use of bioreactors, microbial fuel cells; genetic engineering; the use of bacteria, fungi, yeast, algae and actinomycetes; the use of nanomaterials; the application of ultrafiltration and nanofiltration methods; and adsorption purification.

The possibility and feasibility of applying modern methods for solving problems in the field of wastewater from dyeing and finishing production and its treatment in the textile industry have been established.

Key words: textile industry, dyeing and finishing, dyes, wastewater, treatment.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 08.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/27>**Михайлов Д.О.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Штефан В.В.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Кануннікова Н.О.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМАТИКИ ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОСАДЖЕННЯ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ

У статті висвітлено сучасний стан розробки технологій електрохімічного осадження хромових покриттів із тривалентних електролітів, які розглядаються як екологічно безпечна альтернатива токсичним розчинам на основі Cr(VI) . Розкрито основні труднощі, пов'язані з оптимізацією складу електролітів і параметрів осадження, що визначають морфологію, структуру, тріщинуватість, товщину шару та експлуатаційні властивості покриттів. Проведено порівняльний аналіз хлоридних, сульфатних, комплексних, змішаних та DES-електролітів, які забезпечують різні типи морфології (гладка, зерниста, дендритна, вузлова) залежно від умов процесу. Проаналізовано вплив режимів осадження – постійного струму (DC), ступінчатого (Stepped DC), імпульсного (PC), мікроімпульсного – на формування хромових шарів з бажаними характеристиками. Показано, що використання імпульсних режимів сприяє зниженню тріщинуватості, підвищенню щільності та однорідності покриттів. Узагальнено ефекти різних добавок, а саме таких як: комплексоутворювачі (гліцин, сечовина, цитрати, формиати), органічні сполуки (сахароза, сахарин) та поверхнево-активні речовини (SDS), які впливають на розмір кристалітів, гладкість поверхні та електрохімічну поведінку. Окрему увагу приділено впливу температури й рН на фазовий склад і структурну стабільність хромових осадів. Встановлено, що підвищення температури сприяє кристалізації, однак знижує твердість, тоді як при низькому рН формуються аморфні структури. Наведено приклади складів електролітів, які забезпечують високу корозійну стійкість, низьку густину струму корозії та високі механічні властивості. Проаналізовано взаємозв'язок між морфологією, структурою покриттів та експлуатаційними характеристиками залежно від умов формування. Отримані результати можуть бути використані для розробки ефективних та екологічно безпечних процесів тривалентного хромування з контрольованими характеристиками покриттів, що задовольняють сучасні вимоги до зносостійкості й антикорозійного захисту.

Ключові слова: електроосадження, хромування, корозійна стійкість, структура покриття, імпульсний режим електролізу.

Постановка проблеми. Хромові покриття, отримані методом електроосадження, широко застосовуються завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам, зокрема твердістю, стійкістю до корозії й зносу, а також декоративним властивостям. Протягом тривалого часу основою для їх отримання залишаються електроліти на основі шестивалентного хрому. Проте токсичність сполук Cr(VI) , їх канцерогенний вплив та складність утилізації перетворюють

такі технології на екологічно й технологічно небезпечні [1, 2].

У зв'язку з посиленням екологічних вимог та необхідністю мінімізації шкідливих викидів, зростає інтерес до альтернативних систем на основі тривалентного хрому, іонних рідин, глибоких евтектичних розчинників, а також водно-органічних середовищ. Одночасно виникає потреба в розробці режимів осадження, які б дозволяли отримувати щільні, тріщиностійкі й однорідні

покриття зі стабільними фізико-хімічними властивостями [3–5].

Незважаючи на активні дослідження в цій галузі, досі зберігається низка нерозв'язаних проблем, серед яких – відсутність універсального електроліту, складність забезпечення відтворюваної структури, обмежена контрольованість морфології покриттів, а також неузгодженість між режимами осадження і кінцевими функціональними властивостями. Актуальним є комплексний підхід до аналізу впливу електролітного складу, температури, рН, режимів струму та функціональних добавок на процес формування покриття. Такий підхід дозволить удосконалити технологію та розширити її практичне застосування в умовах сучасних екологічних стандартів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика вдосконалення технологій електрохімічного осадження хромових покриттів активно досліджується впродовж останніх десятиліть у контексті заміни токсичних сполук шестивалентного хрому на більш безпечні альтернативи. У наукових публікаціях [6, 7] особлива увага приділяється застосуванню електролітів на основі тривалентного хрому (Cr(III)), зокрема хлоридних та сульфатних, а також розробці водно-органічних і глибоких евтектичних середовищ (DES).

Згідно з даними [6–8], ефективність покриттів, отриманих з електролітів на основі Cr(III), значною мірою залежить від присутності комплексоутворювачів, органічних добавок і ПАВ, які впливають на морфологію, ступінь кристалічності, тріщинуватість та однорідність шару. Встановлено, що застосування гліцину, сечовини, цитратів та інших комплексоутворювальних агентів дозволяє отримувати щільні покриття зі зниженою пористістю й підвищеною твердістю, хоча проблема стабільності електроліту та контрольованості структури залишається актуальною.

У низці робіт [9–11] розглянуто вплив режимів електроосадження на формування хромових покриттів. Порівняння постійного, імпульсного та мікроімпульсного струму вказує на переваги останніх у досягненні високих протикорозійних властивостей та зниженні дефектності покриттів. Імпульсні режими дозволяють контролювати розмір кристалів, зменшувати напруження та уникати утворенню тріщин.

Окрему увагу приділено впливу температури й рН електроліту на фазовий склад і морфологію покриттів [5, 7]. Підвищення температури сприяє кристалізації та зменшенню твердості покриття, тоді як контроль рН дозволяє регулювати фазову

стабільність і електрохімічну поведінку сформованих плівок. При цьому значення рН нижче 3, як правило, веде до формування аморфних структур з обмеженими протикорозійними властивостями [12–16].

Незважаючи на помітний прогрес у цьому напрямі, в літературі наявна фрагментарність підходів до системної оцінки взаємозв'язку між складом електроліту, режимами осадження та властивостями хромових покриттів [17–22]. Такий факт обумовлює необхідність узагальнення наявних даних та подальших досліджень у напрямі створення екологічно безпечних і технологічно стабільних систем електроосадження хрому.

Постановка завдання. Метою дослідження є систематизація експериментальних даних щодо впливу складу електроліту, температури, рН та режиму електроосадження на структуру, морфологію, тріщинуватість, твердість і протикорозійні властивості хромових покриттів.

Виклад основного матеріалу. Тип електроліту є одним із ключових чинників, що визначають морфологію, тріщинуватість, структуру, товщину та протикорозійні властивості хромових покриттів. У цьому контексті досліджено за останні 5 років хлоридні та сульфатні електроліти, що містять різні комплекси хрому та легувальні компоненти (табл. 1).

Для електроосадження із електролітів № 1, 7–10 як метал-основу використовували мідь; для електролітів № 2, 3 – нержавіючу сталь; для електроліту № 4 – золото; для електролітів № 5, 6 – латунну пластину з нікелевим підшаром. Покриття, осаджені з електролітів на основі $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (№ 1, 2, 5, 7, 8, 10), мали різноманітну морфологію. Зокрема, електроліт № 1 забезпечує нанокристалічну структуру з різною поверхнею: матовою (DC), блискучою (Stepped DC), дзеркальною (PC). Найкращі захисні властивості у хлоридному середовищі досягнуті в режимі Stepped DC ($i_{\text{corr}} = 0,118 \text{ мА/дм}^2$), де спостерігалася мінімальне тріщиноутворення. Електроліт № 7 на основі евтектичного розчинника дає змогу регулювати морфологію покриття через вміст води. При 10% H_2O формувалась щільна структура з низькою корозійною густиною струму ($4,02 \cdot 10^{-6} \text{ А/дм}^2$ у 3,5% NaCl), що свідчить про високі захисні властивості.

Електроліт № 2 з додаванням AlCl_3 забезпечує формування аморфного шару з підвищеною твердістю ($13 \pm 1,7 \text{ ГПа}$), однак наявність наскрізних тріщин негативно впливала на захисні властивості покриття.

Таблиця 1

Склад електролітів, умови осадження та властивості отриманих хромових покриттів

№	Склад електроліту	Режим формування хромових покриттів	Характеристики покриття	Літера-тура
1	106,58 г/л $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 30,03 г/л $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ 5,96 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 33,28 г/л $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 26,75 г/л NH_4Cl 9,27 г/л H_3BO_3 29,22 г/л NaCl	$j = 12 \text{ A/дм}^2$ $t = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau = 120 \text{ хв}$ Відстань анод-катод = 20 мм Рух електроліту = 150 об/хв	Матовий сірий (DC), блискучий (Stepped DC), яскравий блискучий (PC) колір. I_{corr} : DC – 0,147 мА/дм ² . Stepped DC – 0,118 мА/дм ² , PC – 0,249 мА/дм ² . Структура нанокристалічна. Твердість $\approx 3380 \text{ N/мм}^2$.	[10]
2	$\text{CrCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, гліцин, NaCl , $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$t = 50\text{-}55 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau = 1 \text{ мкм/хв}$ $\text{pH} = 0\text{-}2$	Аморфна структура. Твердість $13 \pm 1,7 \text{ ГПа}$. Тріщини по всій товщині шару. Товщина шару хрому 40–100 мкм.	[11]
3	235 г/л $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 30,03 г/л $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 99,96 г/л $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 42,61 г/л Na_2SO_4 20 г/л HCOOH 30,91 г/л H_3BO_3 0,08 г/л $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaSO}_4$	$j = 25 \text{ A/дм}^2$ $t = 30, 50, 60, 70, 80 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau = 60 \text{ хв}$ $\text{pH} = 1,9$	З підвищенням температури структура переходить до кристалічної, зменшується твердість (з 750 до 350 HV) і товщина покриття (з 11,1 до 4,2 мкм).	[12]
4	Вода Milli-Q, 96 % H_2SO_4 , 60 % HClO_4 , 99,995 % Na_2SO_4 , 99,99 % гідрат перхлорату натрію, 30 % NaOH , 35 % H_2O_2 , $(\text{CrOHSO}_4)_2 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$U = -0,3 \text{ В}, -0,5 \text{ В}, -0,75 \text{ В},$ $-0,95 \text{ В}$ $\tau = 30 \text{ хв}$ $\text{pH} = 2,5$ t – кімнатна	Структура аморфна. Тип окисдно-гідроксидна плівка. Плівка стабільна при високому локальному pH.	[13]
5	107 г/л $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 67 г/л HCOOK 14 г/л CH_3COONa 49 г/л H_3BO_3 75 г/л KCl 53 г/л NH_4Cl 10 г/л NH_4Br	$j = 10 \text{ A/дм}^2$ $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau = 4 \text{ хв}$ $\text{pH} = 2,5\text{-}3,3$ (регулювався HCl і NaOH)	Покриття без тріщин. Структура більш аморфна, розмір кристалітів $\approx 1,8 \text{ нм}$. У середовищі 0,01 М NaCl : $E_{\text{corr}} = -0,08 \text{ В}$ та $j_{\text{pass}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ мА/см}^2$	[14]
6	143 г/л $\text{Cr}_4(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2$ 103 г/л $\text{HOC}(\text{COONa})$ $(\text{CH}_2\text{COONa})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,01 г/л NH_2CSNH_2 50 г/л H_3BO_3 110 г/л Na_2SO_4 90 г/л K_2SO_4 2 г/л $\text{C}_7\text{H}_4\text{NNaO}_3\text{S}$	$j = 10 \text{ A/дм}^2$ $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau = 15 \text{ хв}$ $\text{pH} = 3$ (регулювався NaOH та H_2SO_4 10%)	Покриття без тріщин. Структура нанокристалічна, більш кристалічна, розмір кристалітів $\approx 9,3 \text{ нм}$. У середовищі 0,01 М NaCl : $E_{\text{corr}} = +0,003 \text{ В}$ $j_{\text{pass}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ мА/см}^2$	[14]
7	0,4 М $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1 М Холін хлорид 2 М етиленгліколь 0–30 мас. % H_2O	$j = 15 \text{ A/дм}^2$ $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau = 15 \text{ хв}$ Швидкість перемішування 400 об/хв	0–10% H_2O – пориста дендритна структура, 15–25% – щільна вузлова, 30% – гладка з тріщинами. Без H_2O – аморфна. Тріщини з'являються при 30%. $I_{\text{corr}} = 4,02 \cdot 10^{-6} \text{ А/дм}^2$ (10% H_2O).	[15]
8	0,3 М $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1 М форміат амонію 0,03 М KBr 0,5 М KCl 0,5 М $\text{B}(\text{OH})_3$ 0,01, 0,02, 0,03 М $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	$j = 10 \text{ A/дм}^2$ $\tau = 15 \text{ хв}$ $t = 10^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C}$	Без сахарози – численні тріщини. При 0,02 М – тріщини зникають, при 0,03 М – знову з'являються. Найвищий $I_{\text{corr}} = 1,32 \cdot 10^{-6} \text{ А/дм}^2$ при $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ та 0,02 М сахарози.	[16]
9	0,50 М $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,50 М HCOOH 0,50 М $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 0,15 М $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 0,30 М Na_2SO_4 0,50 М H_3BO_3 10 г/л Додецилсульфат натрію	$j = 20 \text{ A/дм}^2$ $\tau = 60 \text{ хв}$ $t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 1,5$	Сріблясто-сірий блискучий колір. Кристалічна вузлова структура, щільна однорідна поверхня з мікротріщинами. Швидкість корозії – 0,024 мм/рік (0,5 М $\text{KCl} + \text{HCl}$, pH 5), $E_{\text{corr}} = 0,585 \text{ В}$. Твердість $\sim 1050 \text{ HV}$.	[17]
10	10 г/л $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 10 г/л $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 96,48 г/л $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 76,85 г/л $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 107,1 г/л $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 61,83 г/л H_3BO_3 0,2 г/л дисульфат натрію	$\tau = 30 \text{ хв}$ $t = 25\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 3\text{-}3,5$ Режим DC: $j = 100\text{-}300 \text{ мА/см}^2$ Режим PC: $j = 300\text{-}600 \text{ мА/см}^2$ $T_{\text{on}} = 0,8\text{-}16 \text{ мс}$, $T_{\text{off}} = 1,2\text{-}24 \text{ мс}$	DC – темна шорстка поверхня, низька корозійна стійкість. PC – гладка, блискуча, малопориста. Без тріщин при $\text{Cr} \leq 24 \text{ } \%$, при $>24 \text{ } \%$ – тріщини й погіршення захисту. $E_{\text{corr}} = -442 \text{ мВ}$, $I_{\text{corr}} = 37 \text{ нА/см}^2$ (в 3,5 % NaCl). Твердість: $\sim 950 \text{ HV}$ (24,6 % Cr), $\sim 730 \text{ HV}$ (11,2 % Cr).	[18]

Електроліти на основі сульфатів хрому (№ 3, № 4, № 6, № 9) демонструють різноспрямовану поведінку залежно від температури, рН та присутності органічних і неорганічних добавок. При осадженні покриття із електроліту № 3 на сталь 304L спостерігалось поступове перетворення морфології від аморфної до кристалічної зі зростанням температури. Найвищі захисні властивості зафіксовано в інтервалі 70–80 °С, де потенціал прориву становив 436,2 мВ [12]. Електроліт № 6 з $\text{Cr}_4(\text{SO}_4)_5(\text{OH})_2$ і тіосечовиною формував нанокристалічні вузлові покриття з нижчою протикорозійною властивістю порівняно з аморфними покриттями з хлоридного електроліту № 5. Сульфатний електроліт (№ 4) також утворював аморфні оксидно-гідроксидні плівки, стабільні за високого локального рН.

Склад електроліту, зокрема наявність ПАР, комплексоутворювачів і органічних сполук, визначає морфологію, структуру та захисні властивості покриття. Гліцин у електролітах № 1 і № 2 сприяє формуванню нанокристалічних або аморфних плівок; у № 1 отримано покриття з твердістю $\sim 3380 \text{ N/mm}^2$ і задовільною захисною стійкістю [10], у № 2 – аморфне, але з наскрізними тріщинами [11]. Сечовина в електролітах № 3 і № 9 забезпечила щільну кристалічну структуру. Для № 9 у поєднанні з мурашиною кислотою сформовано вузлову морфологію з твердістю $\sim 1050 \text{ HV}$ і корозійною швидкістю 0,024 мм/рік [16].

Форміати калію (№ 5) та амонію (№ 8) виступали стабілізаторами структури. У № 8 додавання 0,02 М сахарози усувало тріщини й знижувало струм корозії до $1,32 \cdot 10^{-6} \text{ A/dm}^2$ [16]. Цитратний електроліт № 10 з лимонною кислотою і цитратом натрію забезпечував блискуче дрібнокристалічне покриття за імпульсного струму, оптимально – при $\leq 24\%$ Cr [18]. Введення ПАР (SDS у № 9–10) покращувало змочування, зменшувало розмір кристалів і сприяло формуванню рівномірного покриття з твердістю до $\sim 950 \text{ HV}$ [18]. Сахарин у № 6 сприяє формуванню нанокристалічного шару, хоча захисні властивості поступалися хлоридним покриттям [14]. У № 8 сахароза діяла вибірково: при 0,02 моль/л тріщини зникали, при 0,03 моль/л – знову з'являлися, що вимагає точного контролю її концентрації [16].

Режим осадження суттєво впливає на структуру, товщину, твердість і антикорозійні властивості покриттів. У зразку № 1 DC давав матову поверхню з мікротріщинами, тоді як Stepped DC і PC – блискучі, без тріщин [10]. У зразку № 10 DC призводив до шорсткого шару з низькою корозій-

ною стійкістю, що підтверджує перевагу імпульсних режимів [18]. Stepped DC (зразок № 1) забезпечив найкращу корозійну стійкість у 3,5 % NaCl ($i_{\text{corr}} = 0,118 \text{ mA/dm}^2$) і високу адгезію ($L_c = 21 \pm 4$), при збереженні наноструктури з мінімальною тріщинуватістю. Імпульсний режим (№ 1, № 10) сприяв утворенню щільних, блискучих покриттів без тріщин. Для № 10 оптимізація частоти (25–500 Гц) і $T_{\text{on}}/T_{\text{off}}$ зменшила пористість і розмір зерен (до 57 нм), покращивши I_{corr} (37 nA/cm^2) та твердість ($\sim 950 \text{ HV}$ при 24,6 % Cr). У зразку № 10 короткі імпульси ($T_{\text{on}} = 0,8\text{--}16 \text{ ms}$, $T_{\text{off}} = 1,2\text{--}24 \text{ ms}$) забезпечили щільне, однорідне покриття з контрольованою твердістю й розміром кристалів. Оптиміальні властивості досягались при $\text{Cr} \leq 24\%$; перевищення викликало тріщини [18].

Зростання температури електроліту зазвичай підвищує кристалічність покриття, знижує твердість і тріщинуватість. У зразку № 3 тріщини спостерігались при 30–60 °С ($\sim 750 \text{ HV}$), але зникали при 70–80 °С ($\sim 350 \text{ HV}$), що супроводжувалось підвищенням потенціалу прориву до 436,2 мВ [12]. У № 6 оптимальна температура – 60 °С, хоча протикорозійні властивості поступалися хлоридному № 5 при 30 °С [14]. У № 8 мінімальна тріщинуватість і найнижчий струм корозії у 3,5 % NaCl досягались при -5 °С та 0,02 М сахарози [16].

Значення рН визначає фазову стабільність і структурні властивості покриття. При рН 0–2 (№ 2, № 3) утворювались аморфні шари з тріщинами та низькою стабільністю. У № 5 (рН 2,5–3,3) отримано тріщиностійке аморфно-нанокристалічне покриття з високими протикорозійними властивостями ($E_{\text{corr}} -0,08 \text{ V}$ у 0,01 М NaCl, $-0,412 \text{ V}$ у буфері, рН = 8,4) [14]. У № 4 (рН 2,5) стабілізувалась оксидно-гідроксидна плівка навіть при низьких потенціалах [13].

Хромові покриття демонструють аморфну, нанокристалічну, вузлову, зернисту, дендритну та гладку морфологію залежно від складу електроліту, режиму осадження, температури, рН і добавок. Аморфні шари (№ 2–5, № 7) мають високу твердість (до 13 ГПа) при наявності тріщин і пористості. Нанокристалічні структури (№ 1, № 6) забезпечують високу твердість ($\sim 3380 \text{ N/mm}^2$), адгезію та щільність. Вузлова й зерниста морфологія (№ 7 при 15–25 % H_2O , № 9), що сприяє утворенню щільного шару без тріщин. Дендритна структура (№ 7, 0–10 % H_2O) супроводжується пористістю та зниженою захисною здатністю. Гладкі блискучі покриття (№ 7, № 10) утворювались при 30 % H_2O або імпульсному струмі, відзначаються декоратив-

ністю, але вимагають точного налаштування режиму [10–15, 17, 18].

Висновки. Імпульсні та мікроімпульсні режими осадження є найефективнішими для формування щільних, тріщиностійких покриттів із високою твердістю та низьким струмом корозії. Комплексоутворювачі, органічні добавки й ПАР додатково впливають на мікроструктуру та фазо-

вий склад. Проте для стабільного, відтворюваного й технологічно адаптивного хромування з тривалентних систем необхідні подальші дослідження щодо оптимізації складу електролітів, режимів і механізмів осадження. Результати аналізу можуть стати основою для створення нових технологічних рішень, орієнтованих на промислове застосування.

Список літератури:

1. Moran A., Hall T., Radhakrishnan R., et al. Improving the Wear Performance of Functional Trivalent Chromium Plating Via Pulse-Reverse Electrodeposition. *Surface Technology White Papers*. 2022. Vol. 109, No. 4. P. 1–13.
2. Shtefan V.V., Kanunnikova N.A., Leshchenko S.A. et al. Anodic dissolution of stainless steel in acid solutions. *Записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*. 2019. Т. 30(69). № 2. Ч.2. С. 136–141.
3. Спосіб формування захисних оксидних покриттів на нержавіючій сталі: пат. 147835 Україна: МПК C25D11/34. № u202008156; заявл. 21.12.20; опубл. 16.06.21, Бюл. № 24. 4 с.
4. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2025. Vol. 497. Article No. 131706. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131706
5. Dasque A., Gressier M., Menu M.-J., Taberna P.-L. Fabrication of a pH microsensor for local pH measurement during chromium electrodeposition from a trivalent chromium-based electrolyte. *Electrochemistry Communications*. 2022. Vol. 135. Article No. 107213. DOI: 10.1016/j.elecom.2022.107213
6. Edy J.E., McMurray H.N., Lammers K.R., de Voos A.C.A. Kinetics of corrosion-driven cathodic disbondment on organic coated trivalent chromium metal-oxide-carbide coatings on steel. *Corrosion Science*. 2019. Vol. 157. P. 51–61. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.04.037
7. Zhao H., Liu W., Li Q., Zhang B., Liu J., Yan C., Liu C. Mechanism of Chromium Electrodeposition from Cr(III) Baths on Nickel and Chromium Electrode Surfaces. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. Vol. 15, No. 9. P. 8979–8989. DOI: 10.20964/2020.09.23
8. Chandrasekar M.S., Pushpavanam M. Pulse and Pulse Reverse Plating—Conceptual, Advantages and Applications. *Electrochimica Acta*. 2008. Vol. 53, No. 8. P. 3313–3322. DOI: 10.1016/j.electacta.2007.11.054
9. Shtefan V.V., Balamut N.S., Kanunnikova N.A., Shcholkova A.S., Zuyok V.A., Grudnitskii V.V., Vasilenko R.L. Electrodeposition of chromoxide coatings from electrolytes modified with $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. No. 6(140). P. 131–137. DOI: 10.46813/2022-140-131
10. Meinhold V., et al. Electrodeposition of Thick and Crack-Free Fe-Cr-Ni Coatings from a Cr (III) Electrolyte. *Coatings*. 2022. Vol. 12, No. 1. P. 56. DOI: 10.3390/coatings12010056
11. Guillon R., et al. Mechanical Behaviour of Hard Chromium Deposited from a Trivalent Chromium Bath. *Coatings*. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 354. DOI: 10.3390/coatings12030354
12. Okonkwo B. O., et al. Development and Optimization of Trivalent Chromium Electrodeposit on 304L Stainless Steel to Improve Corrosion Resistance in Chloride-Containing Environment. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 12. P. e22538. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22538
13. Sharifi Z., et al. Mechanism of Cr(III)-Based Oxide-Hydroxide Film Electrodeposition in an Acidic Solution. *Electrochimica Acta*. 2024. Article ID: 145451. DOI: 10.1016/j.electacta.2024.145451
14. León J., et al. Corrosion Resistance of Electroplated Coatings Based on Chromium Trivalent-Baths. *Surface and Coatings Technology*. 2024. Article ID: 130616. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130616
15. Lin T.-T. Effect of H_2O Addition on the Corrosion Resistance of Trivalent Chromium-Carbon Coatings Electrodeposited from Choline Chloride Deep Eutectic Solvent. *International Journal of Electrochemical Science*. 2021. Article ID: 211055. DOI: 10.20964/2021.10.42
16. Sheu H.-H. Effect of Saccharose Concentration and Temperature on the Internal Stress and Corrosion Resistance of Electroplated Chromium Coatings Prepared from Chromium (III) Bath. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. P. 2851–2862. DOI: 10.20964/2020.04.12
17. Tey E., et al. Electrodeposition of High Hardness and High Corrosion Resistance Cr-C Coating Using Trivalent Chromium Bath. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. DOI: 10.1007/s11665-025-10637-4
18. Firouzi-Nerbin H., Nasirpouri F., Moslehifard E. Pulse Electrodeposition and Corrosion Properties of Nanocrystalline Nickel-Chromium Alloy Coatings on Copper Substrate. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 822. P. 153712. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.153712

19. Штефан В.В., Баламут Н.С., Кануннікова Н.О., Кобзев О.В. Імпульсний електроліз хромоксидного покриття на нержавіючій сталі. *Записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72). № 3. С. 92–98. DOI: 10.32838/2663-5941/2022.3/15

20. Штефан В.В., Баламут Н.С., Кануннікова Н.О. Корозійні характеристики сталі 08X18H10/Cr·CrO_x·MO_y (M = Ti, Al, Si). *Colloquium-journal*. 2022. Т. 12(135). С. 27–30.

21. Shtefan V.V. Influence of Al(NO₃)₃ on the morphology of black chromium coating on AISI 304 steel. *Chemical technologies for reconstructing Ukraine in the war and post-war periods: monograph* / V.V. Shtefan, N.S. Balamut, A.S. Shchoklova. Riga, Latvia, 2023. P. 144–162. DOI: 10.30525/978-9934-26-329-3-8

22. Shtefan V.V. Structure and properties of chromium oxide coatings obtained by stationary and non-stationary electrolysis. *Resource- and energy-saving technologies in the chemical industry: monograph* / V.V. Shtefan, N.O. Kanunnikova, N.S. Balamut. Riga, Latvia, 2022. P. 72–84. DOI: 10.30525/978-9934-26-219-7-3

Mykhailov D.O., Shtefan V.V., Kanunnikova N.O. CURRENT STATE OF THE PROBLEMATICS OF THE TECHNOLOGY OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF CHROMIUM COATINGS

The article highlights the current state of development in technologies for electrochemical deposition of chromium coatings from trivalent electrolytes, which are considered an environmentally friendly alternative to toxic Cr(VI)-based solutions. The main challenges related to optimizing electrolyte composition and deposition parameters are outlined, as they determine the morphology, structure, crack formation, coating thickness, and performance properties. A comparative analysis is conducted of chloride, sulfate, complex, mixed, and deep eutectic solvents (DES) electrolytes, which result in various types of morphology (smooth, granular, dendritic, nodular) depending on the process conditions. The influence of different deposition modes including direct current (DC), stepped DC, pulse current (PC), and micro-pulse on the formation of chromium layers with desired characteristics is examined. It is demonstrated that pulse modes help reduce cracking and increase coating density and uniformity. The effects of various additives are summarized, including complexing agents (glycine, urea, citrates, formates), organic compounds (sucrose, saccharin), and surfactants (SDS), which influence crystallite size, surface smoothness, and electrochemical behavior. Special attention is given to the influence of temperature and pH on the phase composition and structural stability of chromium deposits. It is established that higher temperatures promote crystallization but reduce hardness, whereas lower pH values lead to the formation of amorphous structures. Examples of electrolyte compositions are provided that ensure high corrosion resistance, low corrosion current density, and excellent mechanical properties. The relationship between coating morphology, structure, and performance characteristics under varying formation conditions is analyzed. The obtained results can be used to develop effective and environmentally safe trivalent chromium plating processes with controlled coating characteristics that meet modern wear-resistance and anti-corrosion protection standards.

Key words: electrodeposition, chromium plating, corrosion resistance, coating structure, pulse electrolysis mode.

Дата надходження статті: 10.07.2025

Дата прийняття статті: 18.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

УДК 661:606
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/28>

Мітіна Н.Б.

Український державний університет науки і технологій

Мініна Ю.О.

Український державний університет науки і технологій

Овчаренко С.В.

Український державний університет науки і технологій

ДІАГНОСТИКА СТАНУ ҐРУНТІВ, ЩО ЗАЗНАЛИ ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ

У статті проаналізовано наукові праці останніх років де відзначено порушення ґрунтового профілю, зниження біологічної активності та мікробного різноманіття. Опрацювання літературних джерел свідчить, що воєнні дії мають комплексний негативний вплив на ґрунти: руйнування структури ґрунту, ущільнення орного шару, деградація гумусового горизонту та забруднення важкими металами і залишками вибухових речовин. В роботі авторами досліджено ґрунти з території бойових дій (північного степу Східної України м. Костянтинівка); вплив біологічного препарату (біогумусу), одержаного шляхом вермікультивування на відновлення родючості ґрунтів, що зазнали впливу бойових дій. Вивчений мікроскопічно тип дослідних зразків ґрунтів показав їх розвинену структуру за гранулометричним складом, що забезпечуватиме добру водоутримуючу здатність, помірну аерацію і стійкість до пересихання. Визначено підвищений радіаційний фон у зразках із зони бойових дій (БД-1, БД-2), що є локальним радіонуклідним навантаженням внаслідок воєнних дій, техногенних викидів. Вміст важких металів у зразках з бойових дій перевищує гранично допустиму концентрацію за свинцем у 3,75 рази БД-1, у 2,5 рази БД-2. У зразках БД-1, БД-2 зменшення електропровідності майже в 7,8 разів показує на зміну хімічного складу ґрунту внаслідок бойових дій. Визначено, що зразки з міста бойових дій мають зруйновану структуру, зниження мікробіологічної активності, втрату органічної речовини, включаючи гумус. Результати діагностики зразків ґрунтів БД-1, БД-2 вказують на локальний характер забруднення, що корелює з інтенсивністю військових дій. Досліджено біогумус, як відновлювальний біопрепарат для пошкоджених ґрунтів бойовими діями. Оптимальна концентрація біогумусу становила 10% за масою для стимуляції росту пагонів та кореневої системи тест-культури вівса. Результати дослідження показали, що біогумус, отриманий шляхом вермікультивування, є цінним органічним добривом, який не лише покращить агрохімічні властивості ґрунту, але й створюватиме сприятливі умови для розвитку корисної мікрофлори.

Ключові слова: ґрунт, родючість ґрунту, біогумус, біопрепарат, вермікультивування, гумус, важкі метали, бойові дії.

Постановка проблеми. Повномасштабна збройна агресія росії проти України спричинила не лише масштабні людські втрати та руйнування інфраструктури, але й суттєві екологічні наслідки. Одним із найбільш вразливих компонентів довкілля є ґрунтовий покрив, що зазнає фізичної, хімічної та біологічної деградації внаслідок обстрілів, вибухів, пересування важкої техніки та забруднення боєприпасами. Зокрема, територія м. Костянтинівка Донецької області, що підпадає в зону активних бойових дій, є прикладом регіону, де традиційно переважають родючі чорноземні

ґрунти, придатні для ведення сільського господарства. Тому постає актуальна потреба в розробці методів діагностики стану ґрунтів, що зазнали впливу бойових дій. Особливого значення набуває вивчення гранулометричного складу, фізико-хімічних показників та ефективність біологічних методів реабілітації зазначених ґрунтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Унаслідок збройних конфліктів ґрунти зазнають значного техногенного навантаження (забруднення важкими металами, паливно-мастильними матеріалами, залишками боєприпасів,

зміна структури ґрунтового профілю, деградація мікрофлори). В умовах воєнних дій актуальним стає питання розробки біотехнологічних підходів до ремедіації та відновлення родючості уражених територій. Так, авторами [1] вивчено вплив воєнних дій на стан ґрунтів, встановлено підвищення концентрації Pb, Zn, Cd у поверхневих горизонтах ґрунту на ділянках після обстрілів, зниження вмісту гумусу та деградація структури. У зоні вибухів рівень важких металів перевищував фоновий у 5 разів, активність мікроорганізмів нижча в 2–3 рази. Ефективність рослин гіперакумуляторів у вилученні Pb, Cd, Zn з ґрунту [2] показав, що *Brassica juncea* вибирає до 1,2 кг Pb/Га за сезон; *Helianthus annuus* до 2 кг Zn/Га; вивчено здатність вівса та гірчиці з вилучення важких металів [3]. Лабораторні дослідження показали ефективність фіторемедіаційних культур для очищення ґрунтів з Донеччини: овес акумулював до 28 мгZn/кг сухої маси, гірчиця до 19 мгPb/кг. Вивчення мікробіологічного аналізу ґрунтів [4] показало значне зменшення чисельності сапрофітної мікрофлори в 2,5–4 рази та ферментативної активності через забруднення важкими металами та вибухівкою. Проведено вивчення вирв із деградованим профілем та підвищенням вмістом токсикантів у ґрунтах після вибухів, пожеж і руху важкої техніки [5], зокрема у 60% ділянок ураження зафіксовано ущільнення ґрунту та втрата 30–50% біологічної активності. Дослідження науковцями [6] біопрепаратів з азотфіксувальними бактеріями сприяли частковому відновленню мікрофлори за 6 місяців, а саме кількість фосфатмобілізаторів збільшилась у 1,8–2,4 рази, стрептоміцетів у 10–12 разів. Для оцінки фітотоксичності автори [7] використовували овес і гірчицю: розвиток пагонів і коренів у забрудненому ґрунті була вдвічі меншою, а схожість насіння знижена на 40%. Наведено кейси застосування мікробіологічних препаратів на ділянках з бойовими ушкодженнями [8], відновлення структури ґрунту, підвищення вологості та покращення проростання культур відмічене через 3 місяці. Досліджено ефективність біогумусу у відновленні структури і родючості ґрунтів [9] в забруднених зонах. Вміст гумусу зріс на 0,5–1,2%, покращилась структура і водопроникність на 25–30%. Викладено [10], що компост і сапропель позитивно вплинули на фізико-хімічні параметри та врожайність вівса до 40%, відновлення мікрофлори від 30% до 70% залежно від препарату. Аналіз досліджень демонструють ефективність застосування біогумусу, мікробних

препаратів, органічних добрив у процесі екологічної реабілітації постраждалих ґрунтів. Але більшість відновлювальних технологій перебувають на етапі лабораторних випробувань, тому у даному дослідженні було обрано підхід, що поєднує діагностику та біотестування ґрунтів, що зазнали вплив бойових дій з використанням біопрепаратів одержаних шляхом вермікультування (біогумус, біогумат).

Постановка завдання. Метою статті є аналіз стану ґрунтів північного степу Східної України, що зазнали впливу бойових дій.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є зразки ґрунтів з міста бойових дій м. Костянтинівка Донецької області, ґрунт з м. Дніпро без впливу бойових дій; біопрепарат для відновлення родючості ґрунту (біогумус). Використовували у якості поліпшувача біогумус, одержаний вермікультуванням на основі модифікованого соняшникового лушпиння [11]. Для діагностики стану ґрунтових зразків проведено: мікроскопічний аналіз оптичним пристроєм Digital Microscope MM-2288-5X-BN при збільшенні у 100 разів, ціна поділки окулярної шкали становила 0,020 мм; зважування на торсійних вагах WT-500; кислотність, електропровідність та температуру визначали приладом Hanna HI991300, потужність експозиційної дози приладом MASTER-1, вміст важких металів атомно-абсорбційним спектрофотометром Thermo Scientific Solaar S4. Дослідження проводили у п'яти повтореннях, похибка $P \leq 0,5$.

Основним ґрунтоутворюючим типом м. Костянтинівки розташованого у межах північного степу Східної України є звичайний вилужений чорнозем, інколи середньо-суглинковий, із високим вмістом гумусу 4–6% у верхньому горизонті. Ґрунти формувалися на лісових породах за участі степової рослинності й мають потужний гумусовий профіль 60–100 см [12]. Відбір ґрунтових зразків для досліджень проводився з місця безпосереднього вибуху у верхніх горизонтах ґрунту, геолокація (рис. 1): БД-1 48.493578, 37.731980, БД-2 48.493498, 37.732063.

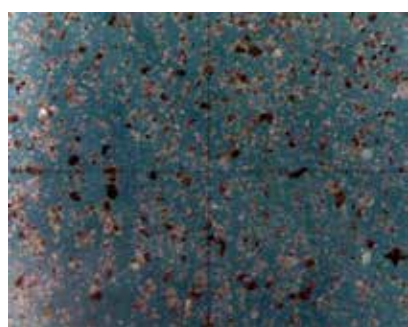
Для експериментів підготовлено зразки: БД-1, БД-2 (ґрунт, відібраний з ділянок, уражених бойовими діями), К контрольний зразок (ґрунт без військового впливу м. Дніпро), Б зразки з внесенням біогумусу. Структура та вміст органіки є критичними чинниками, що найсильніше страждають у наслідок бомбардувань [13]. Мікроскопічний аналіз структури та дисперсності дослідних зразків ґрунтів наведено на рисунку 2.



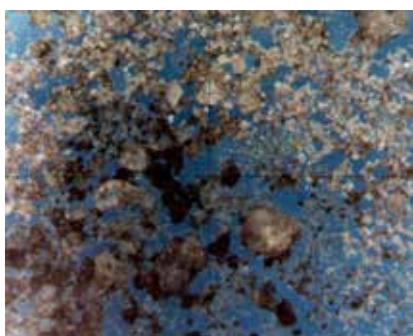
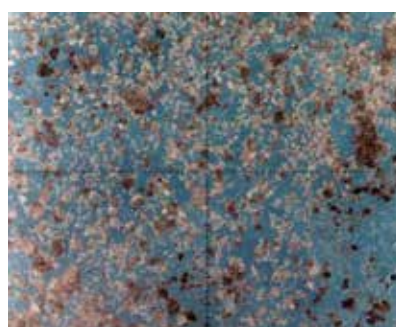
Рис. 1. Геолокація місця відбору зразків ґрунтів

Оцінка особливості структури та гранулометричний склад зразків вивчений за мікроскопічним аналізом зведено до таблиці 1.

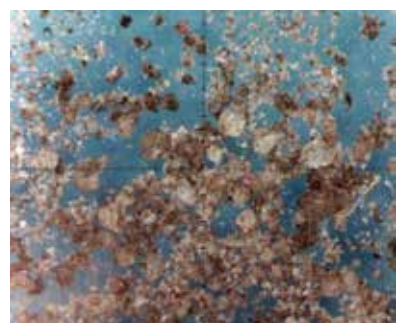
Мікроскопічний аналіз структури та дисперсності ґрунтових зразків (рис. 2) показує, що зразок ґрунту БД-1 здебільшого належить до середньосуглинкових і має у складі до 50% піску з частками 2–0,05 мм. Зразок БД-2 має щільнішу, агреговану структуру з більшою кількістю дрібних фракцій піску 0,05–0,005 мм, глини з частками менше 0,005 мм та ознаками гумусного збагачення. Зразок К має більш однорідну структуру, з рівномірно розподіленими агрегатами пилуватих часток мулу, які складають 30–40%. Частка піску у К менша в два рази, ніж у зразку БД-1, але має більше структурованих агрегатів, ніж зразок ґрунту БД-2. Вивчений тип зразків ґрунтів показує їх розвинену структуру за гранулометричним складом, що забезпечуватиме добру водоутри-



БД-1



БД-2



К

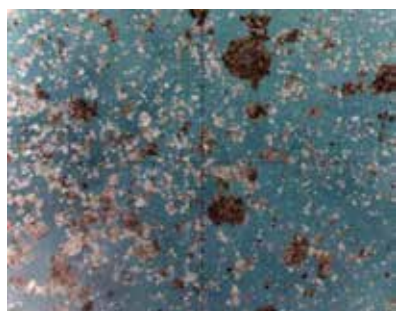


Рис. 2. Мікроскопічний аналіз структури та дисперсності дослідних зразків ґрунтів: БД-1, БД-2 – відібрані з ділянок після вибуху, К – контрольний зразок

Таблиця 1

Характеристика зразків ґрунту за гранулометричним складом

Показник	Оцінка за зображенням	Примітка
Зразок ДБ-1		
Гранулометричний склад	Переважає пісок, дрібніші частки пил та глина	Візуальна оцінка розмірів і розподілу частинок
Тип ґрунту	Супіщаний або легкосуглинковий	Визначено за співвідношенням частинок
Структура ґрунту	Зерниста, агрегована	Видно з наявності скупчень частинок різної величини
Кількість піску	45–50%	Темні, крупні включення
Зразок ДБ-2		
Гранулометричний склад	Значна частка пилуватих та глинистих частинок, частково пісок	Багато дрібних і середніх агрегатів; крупний пісок зустрічається рідше.
Тип ґрунту	Суглинковий або важко-суглинковий	Зменшення кількості піску, більше глинистих агрегатів
Структура ґрунту	Агрегована, грудкувата	Чітко помітні агрегації структури, які утворюються при збагаченні гумусом
Кількість піску	20–30%	Світлі крупні включення
К		
Гранулометричний склад	Переважають дрібні частинки та поодинокі грубі агрегати	Добре виражене поєднання пилу та глини, менше крупного піску
Тип ґрунту	Суглинковий або легкосуглинковий	Висока частка мілко-дисперсних включень і злипання частинок
Структура ґрунту	Помірно агрегована	Спостерігаються округлі агрегації різного розміру, зв'язані органікою
Кількість піску	25–35%	Світлі включення трапляються рідше, ніж у зразку ДБ1, ДБ2

Таблиця 2

Фізико-хімічні характеристики дослідних зразків ґрунту

Найменування зразків	рН	Електропровідність, мкСм/см	Вміст важких металів / мг/кг			Радіаційний фон, мР/год
			Pb	Zn	Cu	
БД1	7,50	331	120	135	60	0,023
БД2	7,53	200	80	110	55	0,024
К	8,50	228	30	50	15	0,011
Б	7,50	1561	-	-	-	-

муючу здатність, помірну аерацію і стійкість до пересихання.

Важкі метали негативно впливають на ґрунтову мікрофлору, призводять до зниження врожайності і якості сільськогосподарської продукції. Тому, після бойових дій ґрунти доцільно діагностувати на радіаційний фон, вміст важких металів. Комплексна оцінка фізико-хімічних і радіаційних властивостей дослідних зразків ґрунтів та біогумусу наведено в таблиці 2.

Значення радіаційного фону в усіх досліджених зразках знаходяться в межах природного фону та не перевищують гранично допустимих рівнів (ГДР) для населення України, які становлять 0,30 мР/год відповідно до державних санітарних норм [14]. Водночас, у зразках із зон бойових дій

(БД-1, БД-2) радіаційний фон є вищим порівняно з контрольним зразком із м. Дніпро в 2 рази. Це може свідчити про локальне радіонуклідне навантаження внаслідок воєнних дій або техногенних викидів. Вміст важких металів у зразках з бойових дій перевищує гранично допустиму концентрацію за свинцем у 3,75 рази БД-1, у 2,5 рази БД-2 [15]. Показники рН у зразках БД-1, БД-2 та біогумусу близькі до нейтральних, у контролі середньо лужне середовище. Лужне середовище у ґрунті пригнічує розвиток більшість мікроорганізмів, а рН 8,5 для деяких штамів може бути менш оптимальним.

Ознаки високої електропровідності біогумусу свідчать про багатий склад на мінеральні елементи (кальцій, магній, калій, нітрати, фосфати та

інші розчинні солі), продукти розкладу органіки. У зразках БД-1, БД-2 зменшення електропровідності майже в 7,8 разів показує на зміну хімічного складу ґрунту внаслідок бойових дій. В подальших дослідженнях доцільно врахувати рН, вміст органічної речовини, наявність конкурентної мікрофлори для відновлення родючості ґрунтів. Таким чином, результати дослідження показують, що біогумус, отриманий шляхом вермікультивування, є цінним органічним добривом, який не лише покращить агрохімічні властивості ґрунту, але й створюватиме сприятливі умови для розвитку корисної мікрофлори.

Для визначення гумінових і фульвокислот використовували класичну методику лужної екстракції з подальшим осадженням кислотами [16, 17]. Результати досліджень на вміст гумусу у зразках зображено на діаграмі (рис. 3).

У порівнянні з біогумусом у зразках БД-1, БД-2 загальний вміст гумусових речовин нижчий на 60–68%. Гумусу у контрольному зразку в 1,68 разів менше, чим у біогумусу, одержаного вермікультивуванням. Зразки БД-1, БД-2 відносяться до дуже низьких за вмістом гумусу.

Для якісної оцінки органічної речовини та ступінь її перетворення на стабільні форми гумусу обчислили індекс гуміфікації (рис. 4).

Данні діаграми зазначають, що у всіх зразках гумусові речовини мають достатній ступінь стабільності. Контроль має індекс 2,4, що свідчить про стабільний добре гуміфікований гумус. Зразки БД-1 та БД-2 мають індекс гуміфікації 2, але нижчий вміст гумусу (0,8% – 1%). У біогумусу індекс гуміфікації ГК/ФК становить 2,08, загальний вміст гумусу 2,5%, що показує добру якість органічної речовини. Вибухи та вогонь

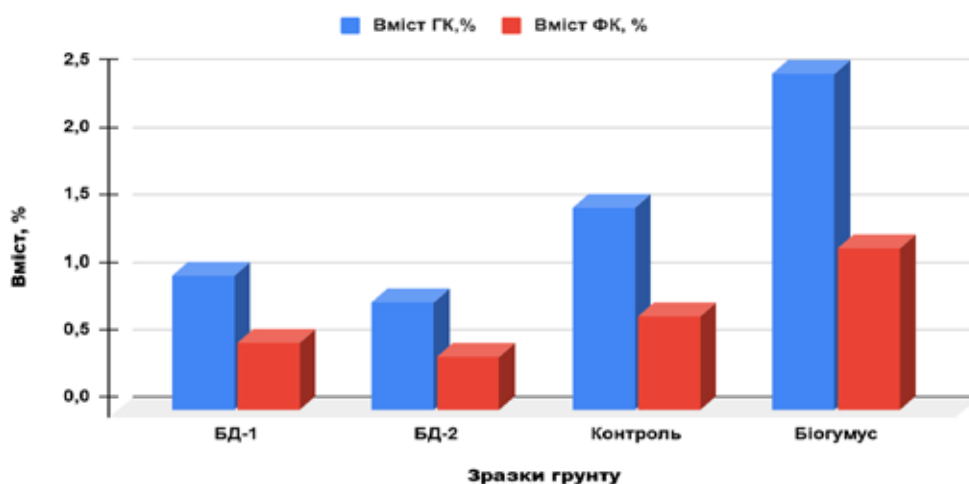


Рис. 3. Вміст гумінових та фульвокислот у дослідних зразках ґрунту

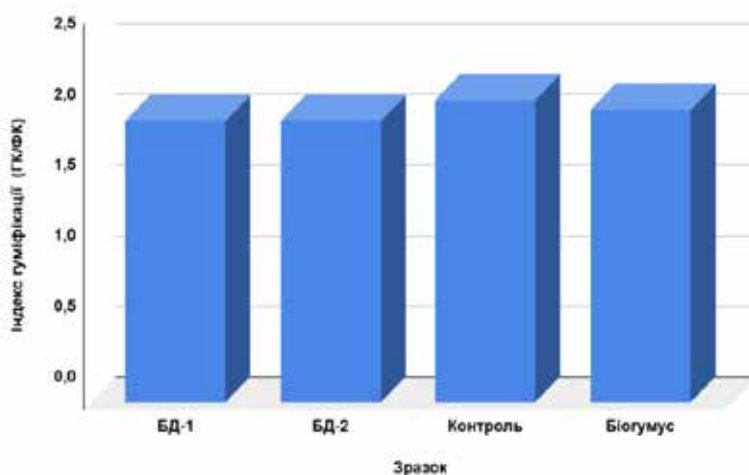


Рис. 4. Індекс гуміфікації у дослідних зразках ґрунту

призводять до часткового вигорання гумінових речовин. Тому, зразки ґрунтів з бойових дій мають зруйновану структуру, зниження мікробіологічної активності, втрату органічної речовини, включаючи гумус.

Отже, індекс гуміфікації біогумусу, загальний вміст гумінових і фульвокислот є суттєво вищими дослідних зразків. Це свідчить про високу ступінь органічного збагачення і наявність як стабільних, так і біологічно активних форм органіки, що важливо для запуску процесів ґрунтоутворення на порушених територіях.

Для оцінки агроекологічної ефективності біогумусу до зразків ґрунтів, що зазнали впливу бойових дій використовували метод фітотестування [18–21]. До дослідних зразків (БД1, БД2) додавали біопрепарат у концентраціях (5%, 10%, 20% за масою). У кожен зразок висівали тест-культури вівса, які досліджували в однакових умовах вологості, освітлення й температури. Спостерігали за динамікою росту пагонів протягом 10 діб, фіксували біометричні показники: кількість пророслих насінин, довжину пагонів. Результати вимірювання росту пагонів в залежності від концентрації біогумусу представлені на діаграмі (рис. 5).

Зразок БД-1 із бойових дій без додавання біогумусу мав ріст пагонів вівса менший у 1,86 рази, БД-2 у 1,41 рази порівняно з контролем. З діаграми бачимо, що середня висота пагонів у зразках БД-2 з додаванням 10% біогумусу на 10-й день становила 7,3 см, що майже вдвічі перевищує контроль та у 3,3 рази переважає за показники БД-1 та БД-2. Це підтверджує, що біогумус може бути ефективним відновлювальним агентом для пошкоджених

ґрунтів бойовими діями. Концентрація біогумусу 30% у всіх дослідних зразках не дає значного приросту вівса, що свідчить про перенасичення поживними речовинами. Оптимальна концентрація біогумусу для стимуляції росту пагонів становила 10% за масою. Динаміка росту коренів вівса на 10-й день фітотестування в залежності від типу ґрунту та концентрації біогумусу наведена на рисунку 6.

При додаванні 10% біогумусу до БД-1 довжина кореня зросла у 1,45 рази, БД-1 у 1,55 рази порівняно з контролем. Таким чином, додавання 10% біогумусу є найбільш ефективною концентрацією для стимулювання росту кореневої системи. Через 60 діб в зразках БД-1, БД-2 з додаванням біогумусу визначено підвищення до 3,7% загального гумусу. Отже, біогумус може ефективно використовуватись для відновлювання родючості ґрунтів що зазнали впливу бойових дій.

Висновки. Встановлено, що ґрунти, які зазнали впливу бойових дій, мають порушену фізико-хімічну структуру (зниження вмісту гумусу та загального органічного вуглецю), низьке значення індексу гуміфікації свідчить про деградацію органічної речовини та зменшення її стабільності. Тип дослідних зразків ґрунтів показав їх розвинену структуру за гранулометричним складом, що забезпечуватиме добру водоутримуючу здатність, помірну аерацію і стійкість до пересихання. Визначено підвищений радіаційний фон у зразках із зони бойових дій, вміст важких металів у верхніх горизонтах ґрунтів значно перевищує фонові рівні, особливо високими є концентрації свинцю, що є екотоксикологічно небезпечним та ство-

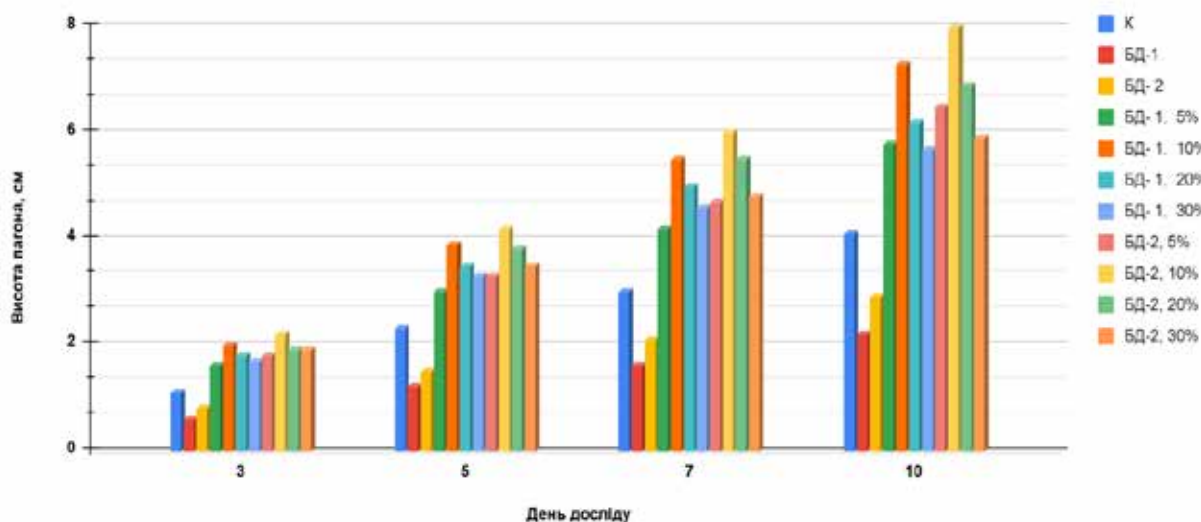


Рис. 5. Динаміка проростання вівса у процесі фітотестування дослідних зразків

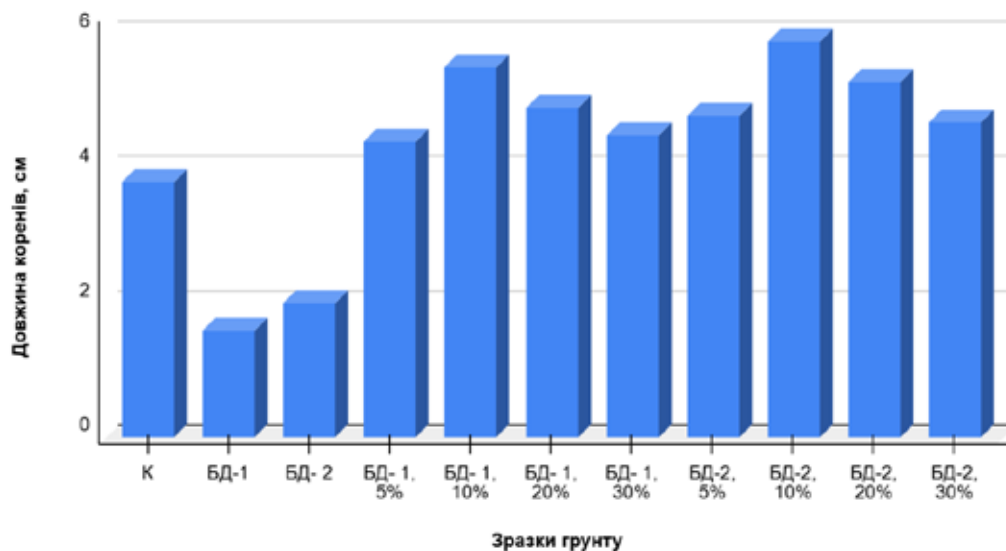


Рис. 6. Динаміка росту коренів вівса дослідних зразків

рює потенційні ризики для довкілля та здоров'я населення. Результати досліджень вказують на локальний характер забруднення, що корелює з інтенсивністю військових дій. Визначений індекс гуміфікації біогумусу, загальний вміст гумінових і фульвокислот показує високу ступінь органічного збагачення і наявність як стабільних, так

і біологічно активних форм органіки, що важливо для запуску процесів ґрунтоутворення. Досліджено біотестуванням, що біогумус, отриманий шляхом вермікультивування, є цінним органічним добривом, який не лише покращить агрохімічні властивості ґрунту, але й створюватиме сприятливі умови для розвитку корисної мікрофлори.

Список літератури:

1. Карабут Г. В., Книш І. Я. Аналіз забруднення ґрунтів внаслідок бойових дій. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2023. № 2. С. 45–52.
2. Allamin, Ibrahim. Phytoremediation of Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review. *Journal of Biochemistry, Microbiology and Biotechnology*. 2021. № 9. Р. 7–14.
3. Melnychenko, V. Phytoremediation of soils contaminated as a result of military and anthropogenic impact. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. Vol. 20. № 4. Р. 72–84.
4. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., Mariychuk, R. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 2013. № 13. Р. 1–23.
5. Вплив війни на родючість ґрунтів: аналіз, загрози та відновлення: звіт по проєкту. Краматорськ: ГО ВЕО До чистих джерел. 2023. 23 с.
6. Волкогон В. В. Мікробіологічні аспекти відтворення родючості ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2011. № 9. С. 9–14.
7. Петросян А. Г., Дятлов С.Є., Тарасенко А. О., Дятлова О.С. Біотестування як метод експрес-оцінки токсичності ґрунтів. *Вісник Одеського національного університету*. 2022. Т. 7. № 1. С. 139–145.
8. Що криється за модним словом біоремедіація, або як біотехнологи БТУ-ЦЕНТР розробляли способи відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями. Київ, 2024. Дата звернення (16 лютого 2024). URL <https://latifundist.com/blog/read/3060>
9. Чайка Т. О., Короткова І. В. Відновлення родючості ґрунту в Україні після воєнних дій. Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення самовідновлення екосистем : колективна монографія / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава : Видавництво ПП «Астроя», 2023. С. 232–281.
10. Skamarokhova Alexand, Yurin Denis, Svistunov Andrey, Nikoghosyan Flora. The influence of a new organic fertilizer based on spropel on the results of germination of seeds of wheat, oats and mung bean. *E3S Web of Conferences*. 2023. Р. 395.
11. Мініна Ю.О., Мітіна Н.Б., Третьяков А.О. Дослідження умов біодеградації полімер-полімерних сумішей в процесі вермікультивування. *Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*. Том 35 (74) № 1. 2024. С. 113–117.

12. Грунти України: властивості, генезис, менеджмент родючості: ред. В. І. Купчик. 2010. 412 с.
13. ДСТУ 4730:2007. Грунти. Визначення гранулометричного (механічного) складу методом піпетування. Київ, 2007. 12 с.
14. ДСЕПІН 6. 6.1. – 079 /211.3.9 001-02 Державні санітарно-екологічні правила і норми з радіаційної безпеки при проведенні операцій з металобрухтом. Київ, 2022. 10 с.
15. ДСТУ 7832:2015. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук свинцю в одонормальній солянокислій витяжці методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. Київ, 2016. 8 с.
16. Lamar R.T., Monda H. Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humate Ores, DOC, Humified Materials and Humic Substance-Containing Commercial Products. *Journal of Visualized Experiments*. 2022. № 181. DOI 10.3791/61233
17. Петрова Ж. О. Дослідження режимів екстрагування гумусових та гумінових речовин. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2015. Вип. 47. № 2. С. 190–194.
18. Тригуб В.І., Домусчи С.В. Біотестування як метод дослідження токсичності ґрунтів. *Вісник Одеського національного університету*. 2020. С. 112–127.
19. Буцяк А.А. Використання біогумусу для підвищення родючості ґрунту і одержання екологічно-безпечної продукції. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького. 2012. Т. 14, № 2(3). С. 33–36.
20. Дудкіна, А. П. Залучення вермідобриг при вирощуванні кукурудзи на рекультивованих ландшафтах. *Таврійський науковий вісник*. Херсон, 2019. Вип.105. С. 67–73.
21. Abbas Haider, Salman Ahmad, Al-Budeiri Muntadher, Ajib Yahya, Al-shaabani Ehab. Effect of Vermicompost Production on some Soil Properties and Nutrients in Plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. P. 2–8. DOI:10.1088/1755-1315/1214/1/012006

Mitina N.B., Minina Yu.O., Ovcharenko S.V. DIAGNOSIS OF THE CONDITION OF SOILS AFFECTED BY COMBAT ACTIONS

The article analyzes recent scientific works that note soil profile disturbances, decreased biological activity, and microbial diversity. A review of the literature shows that military actions have a complex negative impact on soils: destruction of soil structure, compaction of the arable layer, degradation of the humus horizon, and contamination with heavy metals and explosive residues. In this work, the authors studied soils from the combat zone (the northern steppe of eastern Ukraine, Kostyantynivka); the effect of a biological preparation (biohumus) obtained by vermiculture on the restoration of soil fertility affected by combat operations. Microscopic examination of the experimental soil samples revealed their developed structure in terms of granulometric composition, which will ensure good water retention capacity, moderate aeration, and resistance to drying out. An increased radiation background was determined in samples from the combat zone (BD-1, BD-2), which is a local radionuclide load due to military actions and man-made emissions. The heavy metal content in samples from the combat zone exceeds the maximum permissible concentration for lead by 3.75 times in BD-1 and 2.5 times in BD-2. In samples BD-1 and BD-2, a decrease in electrical conductivity by almost 7.8 times indicates a change in the chemical composition of the soil due to military operations. It has been determined that samples from the city of combat operations have a destroyed structure, reduced microbiological activity, and loss of organic matter, including humus. The results of the diagnosis of soil samples BD-1 and BD-2 indicate the local nature of the contamination, which correlates with the intensity of military operations. Biohumus was studied as a restorative biological product for soils damaged by military operations. The optimal concentration of biohumus was 10% by weight to stimulate the growth of shoots and the root system of the test culture of oats. The results of the experiment showed that vermicompost obtained by vermiculture is a valuable organic fertilizer that will not only improve the agrochemical properties of the soil but also create favorable conditions for the development of beneficial microflora.

Key words: soil, soil fertility, biohumus, biological preparation, vermiculture, humus, heavy metals, combat operations.

Дата надходження статті: 16.07.2025

Дата прийняття статті: 23.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Павловський Д.О.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Левандовський І.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА СТРУКТУРНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ВИРОБІВ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ І ПОЛІКАРБОНАТУ ПІД ДІЄЮ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

У роботі проведено комплексне дослідження процесів первинної деградації полімерних матеріалів, що застосовуються у виробництві споживчої тари, зокрема поліпропілену (PP) та полікарбонату (PC). Основною метою дослідження було визначення стабільності цих полімерів під впливом водного середовища та зовнішніх факторів, які моделюють умови їх зберігання і використання. Такі дослідження є актуальними з огляду на зростаючу увагу до екологічної безпеки матеріалів та необхідність оцінки потенційних ризиків, пов'язаних із деградацією полімерних упаковок у побутових і промислових умовах. Важливою частиною дослідження стало вивчення вивільнення мікро- та наночастинок з поверхні полімерів, оскільки такі фрагменти можуть становити значну екологічну загрозу та впливати на здоров'я людини. Для оцінки кількісних і якісних характеристик вивільнених частинок був застосований метод динамічного світлорозсіювання (DLS). Результати аналізу засвідчили наявність частинок у широкому діапазоні розмірів – від 3,6 до 3000 нанометрів, із високим показником полідисперсності ($PDI > 0,7$), що вказує на суттєву гетерогенність продуктів деградації. Така полідисперсність свідчить про складний характер руйнування полімерів і наявність як дрібних наночастинок, так і більших мікрочастинок у середовищі. Додатково для морфологічного дослідження поверхні зразків до і після експозиції використовувався метод скануючої електронної мікроскопії (SEM). Отримані зображення підтвердили формування нано- та мікрочастинок пластику, які утворилися в процесі імітації експлуатації тари. Візуалізація поверхні показала значне пошкодження поліпропіленових зразків, з появою тріщин і вибоїн, що свідчить про їхню високу схильність до деструктивних змін у заданих умовах. Натомість полікарбонат демонстрував більш стійку структуру, з менш вираженими ознаками деградації. Разом із тим, полікарбонат має потенційно вищий токсикологічний ризик через можливе вивільнення органічних сполук, які можуть впливати на біохімічні процеси і мати небажані ефекти для організму людини і довкілля. Це підкреслює необхідність не лише оцінки механічної та структурної стабільності полімерних матеріалів, але й хімічних аспектів їх деградації.

Ключові слова: поліпропілен, полікарбонат, деградація, мікропластик, нанопластик, SEM, DLS, стабільність.

Постановка проблеми. Сучасна екологічна ситуація свідчить про стрімке зростання рівня забруднення навколишнього середовища мікро- та нанопластиком, що зумовлює підвищену увагу з боку науковців, медичних експертів, екологів і регуляторних органів. Основну частину таких частинок становить вторинний пластик, що утворюється внаслідок поступової деструкції полімерних матеріалів під впливом фізико-хімічних факторів, зокрема ультрафіолетового випромінювання, термічних коливань та механічних наванта-

жень. Серед найбільш поширених джерел мікропластику є побутові полімерні вироби – зокрема пластикові пляшки, включно з ємностями для дитячого харчування, які широко використовуються у повсякденному житті. Вивільнені в процесі експлуатації частинки можуть проникати в організм людини з питною водою, що викликає обґрунтовані занепокоєння щодо їх токсикологічного впливу [1–2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова спільнота переважно зосереджується на

дослідженнях, пов'язаних із виявленням та кількісною оцінкою мікропластику у водних середовищах або океанічних зразках. Водночас, значно менше уваги приділяється моделюванню умов експлуатації побутових полімерів та аналізу механізмів їх деградації. Також бракує системного підходу до порівняльного вивчення різних типів полімерів з позиції їх стабільності та екологічної безпечності [3–4]. Особливо відчутним є дефіцит міждисциплінарних досліджень, які б поєднували морфологічний аналіз поверхні матеріалів (SEM), нанометричну характеристику частинок, що вивільняються (DLS), та інтегральну оцінку їх екологічного ризику із застосуванням сучасних аналітичних підходів. Технічні складнощі виявлення нанопластикових частинок (особливо тих, що мають розміри <100 нм), відсутність адаптованих до реальних умов стандартів та недостатня інтеграція принципів «зеленої» хімії у дослідження полімерів – усе це гальмує об'єктивну оцінку їх безпечності. Існуючі методи рідко враховують специфіку експлуатаційного навантаження на полімери, як-от механічне очищення, повторне використання чи довготривале зберігання рідин.

У зв'язку з цим виникає необхідність у застосуванні комплексного підходу, який би поєднував мікроскопічну оцінку морфологічних змін полімерної поверхні, визначення розміру та полідисперсності частинок, що вивільняються, а також сучасні інструменти оцінки екологічності (greenness) досліджуваних матеріалів. Такий підхід ґрунтується на концепції зеленої аналітичної хімії, адаптованої до досліджень мікропластику та наноматеріалів.

Постановка завдання. Проведене дослідження має на меті комплексне вивчення пове-

дінки поліпропіленових і полікарбонатних пляшок у змодельованих умовах експлуатації. Отримані результати дозволили встановити, що поліпропілен, попри нижчу механічну стійкість, демонструє більш прийнятний екологічний профіль завдяки менш токсичному складу, що робить його потенційно безпечнішою альтернативою для пакування рідин.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень.

Перед початком експерименту пластикові пляшки піддавалися стандартній процедурі очищення, яка включала миття внутрішньої поверхні за допомогою води та м'якого йоржика (рис. 1). Після цього зразки ретельно ополіскували дистильованою водою з метою усунення залишків механічних домішок та мийних речовин. Очищені пляшки висушували при кімнатній температурі у чистих умовах. Після висушування пляшки наповнювали дистильованою водою та залишали у закритому стані на зберігання протягом 15 діб. Усі зразки зберігалися за контрольованих лабораторних умов: при кімнатній температурі, з обмеженим доступом світла, без впливу зовнішніх джерел тепла або механічного навантаження. Для фільтрування використовували фільтр із порами 0.2 мкм. Фільтр із осадом висушували. Далі проводили дослідження сканувальної електронної мікроскопії. Морфологічні особливості поверхні полімерних зразків після циклів експлуатації та миття були досліджені методом сканувальної електронної мікроскопії (SEM). Зразки полімерів (полікарбонат (PC) та поліпропілен (PP)) попередньо висушували в ексікаторі при кімнатній температурі, а далі фрагменти розміром 5×5 мм фіксували на алюмінієвих стубах з використанням

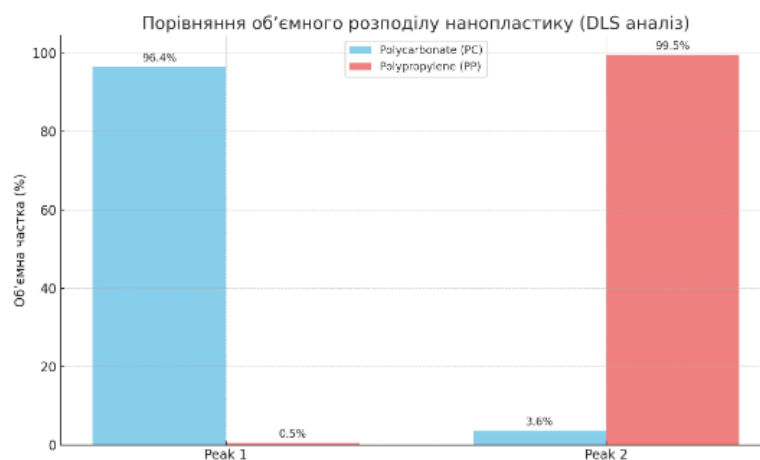


Рис. 1. Порівняння об'ємного розподілу нанопластикових частинок, вивільнених із пляшок з полікарбонату (PC) та поліпропілену (PP), за результатами DLS-аналізу

струмопровідної вуглецевої стрічки. Для покращення провідності поверхні зразки були напilenі тонким шаром золота (~10 нм) у вакуумному напилювачі методом катодного розпилення. SEM-зображення отримували за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510LV при прискорювальній напрузі 10–20 кВ. Аналіз морфології дозволив виявити характерні дефекти, тріщини, ерозійні утворення та фрагментацію поверхні, що свідчить про процеси деградації матеріалу.

Для аналізу розподілу за розміром мікро- та нанопластикових часток, які вивільнялися з полімерної тари, застосовували метод динамічного розсіювання світла (DLS). Зразки води, що зберігалася у полімерних пляшках (PC і PP) протягом 15 діб після імітованого побутового миття, центрифугували (за потреби) при 4000 об/хв протягом 10 хв для осадження грубих домішок. Вимірювання проводили без попередньої фільтрації, щоб зберегти повний профіль частинок. DLS-аналіз проводили на приладі Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments) з довжиною хвилі лазера 633 нм при температурі 25 °C.

Отримані експериментальні результати.

Згідно з отриманими експериментальними даними, встановлено, що поліпропілен (PP) за умов моделювання побутової експлуатації демонструє вищу схильність до деградаційних процесів порівняно з полікарбонатом (PC). Результати аналізу вказують на те, що поліпропіленові пляшки вивільняють мікро- та нанопластикові частинки швидше та в більших кількостях, що підтверджується значною інтенсивністю сигналів при DLS-аналізі водних екстрактів. Такий ефект може бути зумовлений меншою хімічною інертністю PP, а також його нижчою термостабільністю, що сприяє руйнуванню полімерних ланцюгів під дією механічних навантажень та температурних коливань (Рис. 1). При багаторазовій механічній обробці (миття, стирання) поліпропілен виявив вищий рівень деструкції, ніж PC, що узгоджується з відомими фізико-хімічними властивостями цих матеріалів. Динамічне світлорозсіювання (DLS) екстрактів води, що зберігалась у дослідних зразках, виявило високі значення індексу полідисперсності ($PDI > 0.7$) як для PP-, так і для PC-пляшок, що вказує на широкий спектр розмірів частинок, які були вивільнені в рідину.

Це свідчить про наявність у системі як нанорозмірних (3,6–120 нм), так і мікророзмірних частинок (до 994–3777 нм), що можуть формувати агрегати або кластери (рис. 2). Такий двомодальний розподіл є характерною ознакою прогресу-

ючого процесу фрагментації полімеру, внаслідок якого утворюються як первинні наночастинки, так і вторинні укрупнені структури. Особливу увагу заслуговує наявність частинок у нанорозмірному діапазоні, які, ймовірно, утворюються на ранніх стадіях руйнування полімерної матриці. Цей процес передбачає поступовий розрив ковалентних зв'язків у полімерному ланцюгу з утворенням стабільних низькомолекулярних фрагментів, що зберігають здатність до тривалого зваженого перебування у водному середовищі. Отримані результати DLS були додатково підтверджені за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM), яка дозволила візуалізувати наночастинки та мікрочастинки, що вивільнилися в процесі чищення та осіли на фільтрі (рис. 2). Скануюча електронна мікроскопія залишкового сухого осаду після випаровування водного розчину, утвореного внаслідок інтенсивного очищення пластикових пляшок з поліпропілену (PP), виявила різноманітні за формою та розміром частинки мікропластику (рис. 3 та рис. 4). Зображення свідчать про наявність фрагментів із нерівною, шорсткою поверхнею, які мають гострі краї та численні тріщини, що характерно для матеріалів, зазнали механічного і хімічного руйнування. Частинки переважно неправильних, асиметричних форм із вираженими ребрами та вигинами, що вказує на їх фрагментовану природу. Розмірний діапазон частинок варіювався від кількох мікрометрів до кількох сотень мікрометрів. Спостерігалися як великі уламки, так і дрібніші частинки, що можуть бути початковими ланками для утворення нанофрагментів. Отримані морфологічні характеристики підтверджують складність та неоднорідність мікропластикових частинок, які вивільняються в навколишнє середовище з поліпропіленових виробів у результаті їх інтенсивного очищення та експлуатації. Отримані результати свідчать, що морфологічні відмінності частинок пластику, а саме для PP характерна ламкість, наявність грубих країв та слідів механічного зносу. PC-пляшки демонстрували гладші частинки з ознаками термічної ерозії, утворені ймовірно внаслідок деструкції бісфенолу-А в структурі. Частинки з PC проявляли тенденцію до агломерації, що може вказувати на можливу наявність електростатичного заряду або хімічну реактивність їх поверхні. Отже, поєднання даних DLS-аналізу з морфологічним SEM-дослідженням дозволило комплексно охарактеризувати ступінь деградації полімерів, кількісно оцінити вивільнення нанопластикових частинок та визначити потенційні

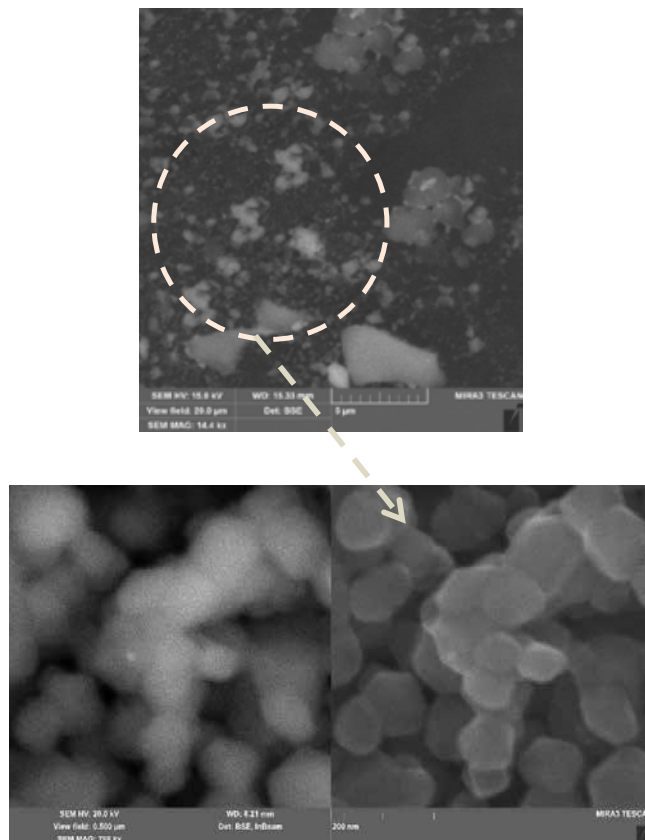


Рис. 2. СЕМ-аналіз мікропластику, виявлених у залишковому сухому осаді після випаровування водного розчину, що утворився внаслідок інтенсивного очищення двох пластикових пляшок з поліпропілену (PP)

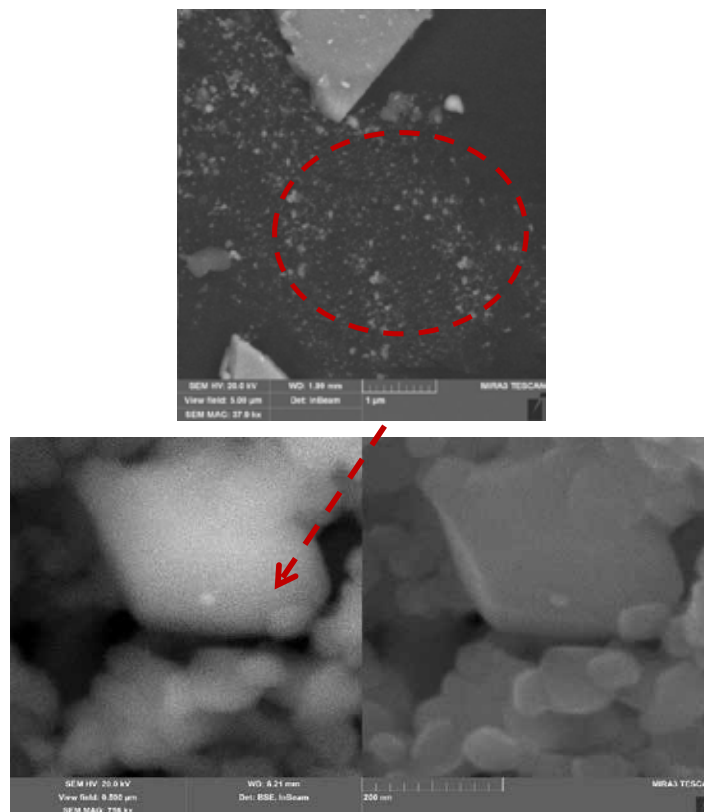


Рис. 3. СЕМ-аналіз мікропластику, виявлених у залишковому сухому осаді після випаровування водного розчину, що утворився внаслідок інтенсивного очищення пластикових пляшок з полікарбонату

Таблиця 1

Морфологічна характеристика вивільнених частинок за даними СЕМ

Тип пластику	Переважаюча форма частинок	Поверхнева структура	Ознаки деградації	Агрегація
Поліпропілен (PP)	Уламки, фрагменти	Шорстка, нерівна	Механічна абразія	Слабка
Полікарбонат (PC)	Зерна, пластівці	Гладка, з тріщинами	Термічна ерозія	Схильність до агрегації

ризика, пов'язані з експлуатацією різних типів пластикових пляшок у побуті (рис. 3). Аналіз частинок, вивільнених у воду з полімерних ємностей, показав наявність як мікрометрових (до 3–4 мкм), так і нанометрових часток. Частинки розміром понад 1 мкм можуть утворюватися внаслідок подальшої фрагментації більших фрагментів або агрегації дрібніших наночастинок.

Утворення таких агрегатів, ймовірно, зумовлено гідрофобними взаємодіями, водневим зв'язуванням або залишковими поверхневими зарядами. DLS-аналіз не завжди дозволяє чітко диференціювати окремі частки від агрегатованих структур, що ускладнює інтерпретацію розмірного розподілу. Високі значення полідисперсного індексу ($PDI > 0.7$) та присутність фракцій великого розміру свідчать про формування вторинних кластеризованих структур. Наявність кластерів має значний токсикологічний потенціал, оскільки такі структури можуть сорбувати на своїй поверхні інші забрудники – зокрема, іони важких металів, пер- та поліфторалкільовані сполуки (PFAS), залишки мономерів тощо – підвищуючи ризики їх біоаккумуляції і трансмісії в екосистемах. Механічна очистка ємностей, яка моделює побутові умови повторного використання (миття з йоршиком), виявилася критичним фактором інтенсифікації вивільнення часток, особливо у випадку поліпропіленових зразків.

Це пов'язано з нижчою хімічною стійкістю та механічною стабільністю поліпропілену в порівнянні з полікарбонатом. Попри кращу термічну та структурну стабільність, поверхня полікарбонату також зазнає деградації в умовах зберігання, що супроводжується утворенням нанофрагментів. Окрім цього, полікарбонат здатен вивільняти низькомолекулярні сполуки, зокрема бісфенол-А, що мають відомий ендокринно-деструктивний ефект. Фіксація часток розміром менше 100 нм є особливо важливою з точки зору оцінки біологічного впливу, оскільки такі наноструктури

здатні проникати крізь біологічні бар'єри, зокрема клітинні мембрани та гематоенцефалічний бар'єр. Це свідчить про потенційну цитотоксичність та потребу в подальшому токсикологічному дослідженні. Отже, широкий розподіл часток за розміром, підтверджений даними DLS, свідчить про безперервний процес вивільнення полімерного матеріалу у воду в умовах звичайної експлуатації. Це ставить під сумнів безпечність багаторазового використання таких ємностей без належного контролю фізико-хімічного стану матеріалу. Отримані результати необхідно враховувати при розробці технічних регламентів щодо безпечного використання харчової упаковки, а також при оцінці впливу полімерів на довкілля та здоров'я людини.

Висновки. Полікарбонатні пляшки генерують більше нанопластику, особливо при багаторазовому використанні з гарячою водою при митті із щіткою. Поліпропіленові пляшки мають нижчий рівень вивільнення частинок, однак створюють більші уламки. Пляшки з полікарбонату вивільняють переважно наночастинки, з більш вузьким розподілом розмірів. Натомість поліпропіленові пляшки генерують переважно мікропластик значно більшого розміру, з високим ступенем полідисперсності. Це свідчить про відмінні механізми деструкції полімерів: переважно термодеструкція для PC і механічна деградація для PP. Метод динамічного світлорозсіювання (DLS) підтвердив формування мікро- та наночастинок у широкому діапазоні розмірів (3,6–3000 нм) із високою полідисперсністю, що вказує на гетерогенність продуктів деградації. Морфологічний аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії зафіксував наявність частинок мікро- та нанопластику. Порівняльний аналіз показав, що поліпропілен має більшу схильність до деструктивних змін в умовах, що моделюють процес чищення, тоді як полікарбонат зберігає більш високу структурну стабільність.

Список літератури:

1. Huang Z., Wang H. Study on the impact of photoaging on the generation of very small microplastics (MPs) and nanoplastics (NPs) and the wettability of plastic surface. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 92963-92982.

2. Liu Y., Han J., Wang Y., Li A., Zhao J., Su Y., Shen L., Xing B. Suspected sources of microplastics and nanoplastics: Contamination from experimental reagents and solvents. *Water Research*. 2024. Vol. 249. P. 120925-120935.
3. He Y. Y., Weston K., Suratman S. The effect of storage conditions and washing on microplastic release from food and drink containers. *Food Packaging and Shelf Life*. 2022. Vol. 32(100826). P. 1-9.
4. Süß M., Fischer J. Microplastic occurrence during the pre-treatment of polypropylene in a simulated washing process for mechanical recycling. *Monatshefte für Chemie Chemical Monthly*. 2023. P. 1-4.
5. He H., Liu K., Guo Z., Li F., Liao Z., Yang X., Ren X., Huang H., Huang B., Pan X. Photoaging mechanisms of microplastics mediated by dissolved organic matter in an iron-rich aquatic environment. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 860 (160488). P. 1-11.
6. Павловський Д.О., Левандовський І.А., Воробйова В.І. Оцінка деградації полімерної тари та вивільнення мікро- і наночастинок у рідинне середовище. *Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи*: матеріали Х Всеукраїнської науково-методичної конференції. (м. Шостка, 24 квітня 2025 р.). Суми, 2025. С. 51-54.

Pavlovsky D.O., Levandovsky I.A. ASSESSMENT OF STRUCTURAL STABILITY OF PRODUCTS MADE OF POLYPROPYLENE AND POLYCARBONATE UNDER THE ACTION OF AQUEOUS ENVIRONMENT

The work conducted a comprehensive study of the processes of primary degradation of polymeric materials used in the production of consumer packaging, in particular polypropylene (PP) and polycarbonate (PC). The main goal of the study was to determine the stability of these polymers under the influence of the aquatic environment and external factors that simulate the conditions of their storage and use. Such studies are relevant in view of the growing attention to the environmental safety of materials and the need to assess the potential risks associated with the degradation of polymeric packaging in domestic and industrial conditions. An important part of the study was the study of the release of micro- and nanoparticles from the surface of polymers, since such fragments can pose a significant environmental threat and affect human health. To assess the quantitative and qualitative characteristics of the released particles, the dynamic light scattering (DLS) method was used. The analysis results showed the presence of particles in a wide range of sizes – from 3.6 to 3000 nanometers, with a high polydispersity index ($PDI > 0.7$), which indicates significant heterogeneity of degradation products. Such polydispersity indicates the complex nature of polymer destruction and the presence of both small nanoparticles and larger microparticles in the environment. Additionally, the scanning electron microscopy (SEM) method was used to morphologically study the surface of the samples before and after exposure. The obtained images confirmed the formation of nano- and microparticles of plastic, which were formed during the process of simulating the operation of the container. Surface visualization showed significant damage to polypropylene samples, with the appearance of cracks and potholes, which indicates their high susceptibility to destructive changes under given conditions. In contrast, polycarbonate demonstrated a more stable structure, with less pronounced signs of degradation. However, polycarbonate has a potentially higher toxicological risk due to the possible release of biophenols, compounds that can affect biochemical processes and have undesirable effects on the human body and the environment. This emphasizes the need to assess not only the mechanical and structural stability of polymeric materials, but also the chemical aspects of their degradation.

Key words: polypropylene, polycarbonate, degradation, microplastic, nanoplastic, SEM, DLS, stability.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 11.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Пилипенко Т.М.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Єфімова В.Г.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Єднак А.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА КОМПОЗИЦІЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМУЛЬСІЙНИХ КОСМЕТИЧНИХ ПРОДУКТІВ

Стаття присвячена розробці композицій та дослідженню емульсійних косметичних продуктів. Тип емульгатора та обраний метод приготування водно-олійної емульсії мають вирішальне значення для консистенції, однорідності та зовнішнього вигляду косметичної системи. Вони значною мірою впливають на текстуру, стабільність та сенсорні характеристики готового продукту. Один косметичний продукт (крем № 1) виготовлено методом холодного емульгування, без нагрівання. Це стало можливим завдяки додаванню в композиційну систему олій (гідрогенізованої олії ши, олії мигдалю, олії жожоба, олії авокадо), що не потребують плавлення, та емульгаторам холодної дії під торговою назвою Aculyn 2051, INCI: Sodium Polyacrylate (and) Dimethicone (and) Cyclopentasiloxane (and) Trideceth-6 (and) PEG/PPG-18/18 Dimethicone. Другий косметичний продукт (крем № 2) виготовляється за традиційною гарячою технологією емульгування. У рецептурі цього продукту використано компоненти Olivem 1000 (INCI: Cetearyl Olivatе, Sorbitan Olivatе) та Glyceryl Stearate, що є емульгаторами прямої дії. До складу обох косметичних продуктів введено консервант Nipaguard PE 9010, складник, що є ефективною комбінацією феноксиетанолу та етилгексилгліцерину. Він забезпечує широкий спектр антимікробної дії та стабільність продукту, а також підходить для використання в емульсійних системах. Встановлено, що холодна технологія емульгування має високу ефективність. Вона дозволила отримати стабільну композицію з приємними тактильними властивостями, без потреби нагрівання. Це є особливо важливим при використанні термолабільних активних компонентів засобу. Гаряче емульгування виявилось менш ефективним у забезпеченні тривалої стабільності, особливо за умов зберігання та механічного стресу косметичної системи. У статті розкрито ефективність застосування ультразвукової обробки як альтернативного методу для високошвидкісного перемішування одержаних емульсійних систем. Ультразвукова обробка значно покращує гомогенність та стабільність косметичної продукції. Отриманими результатами підтверджено важливість раціонального вибору технологічного підходу для одержання сучасних емульсійних косметичних продуктів з покращеними характеристиками.

Ключові слова: композиція, косметичний продукт, крем, емульгатор, емульсія, емульгування, стабільність, ефективність.

Постановка проблеми. Розробка композицій та дослідження емульсійних косметичних продуктів з відповідними характеристиками, які покращують стан шкіри, уповільнюють процеси її старіння, забезпечують здоровий вигляд, – актуальна задача сьогодення. Вона вимагає всебічного вивчення, пошуку нових рішень, технологічних

підходів для створення якісної та ефективної косметичної продукції [1–7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний ринок емульсійних косметичних продуктів по догляду за шкірою має необхідність розробки нових засобів, які можуть задовільнити відповідні потреби споживачів [1; 2; 6; 7]. Важли-

вим є забезпечення якісного догляду за шкірою, яка потребує додаткового живлення, зволоження, захисту від негативного впливу навколишнього середовища. Розробка високоефективних емульсійних косметичних продуктів із покращеними характеристиками – важливе завдання сучасної косметичної хімії.

У косметичних продуктах різного призначення широко уживаними є натуральні олії [3], які мають високі дерматологічні характеристики та забезпечують необхідний рівень живлення та захисту шкіри.

З метою забезпечення стабільності емульсійних систем до їх складу додають емульгатори, наприклад, Plantasens HP-10, Olivoil Avenate Emulsifier, цетиловий спирт. Комбінування та використання суміші емульгаторів дозволяє досягти кращої стійкості емульсії, а також однорідності її структури [2; 4].

Для запобігання мікробного забруднення та забезпечення тривалого терміну придатності у склад косметичних продуктів вводять консерванти [2], наприклад, натрій бензоат, калій сорбат та інші.

Як складники, що виявляють антиоксидантні, регенеруючі, омолоджуючі властивості, використовують активні компоненти, концентрацію яких підбирають таким чином, щоб забезпечити ефективність косметичного продукту без ризику подразнення шкіри [1].

Композиційні складники емульсійних косметичних продуктів ретельно підбирають для забезпечення відповідних характеристик. Їх вибір базується на принципах нетоксичності, природності, етичності, що дозволяє забезпечити якісний догляд за шкірою без використання продуктів тваринного походження. Такий підхід до створення сучасних косметичних композицій дозволяє одержувати високоефективні продукти з вираженими живильними, зволожуючими, захисними та омолоджуючими властивостями [4–7].

Постановка завдання. Необхідним завданням при створенні якісних та ефективних емульсійних косметичних продуктів по догляду за шкірою є підбір, дослідження складників композиційних систем, вивчення їх фізико-хімічних характеристик, аналіз якості та безпечності використання, а також вибір раціональних сучасних технологічних підходів виробництва.

Виклад основного матеріалу. Проведено підбір компонентів емульсійних косметичних систем з урахуванням виявлення ними покращених характеристик, зокрема, відновлюючих і захисних властивостей. Такий підбір зумовлений зростаю-

чими потребами у догляді за шкірою, яка старіє, піддається стресам, впливу екологічних факторів та ультрафіолетового випромінювання. Характеристики деяких композиційних складників наведено у таблиці 1.

З підібраними складниками виготовлено дві косметичні водно-олійні емульсійні системи, рецептури яких наведено у таблиці 2. Кожен компонент ретельно підібраний для забезпечення живильної, зволожуючої, відновлюючої, захисної дії продукту. Обрані склади поєднують натуральність, безпечність та ефективність у використанні.

Крем № 1 виготовлено методом холодного емульгування, без нагрівання. Це стало можливим завдяки використанню олій, які не потребують плавлення, та емульгаторам холодної дії [2; 4] під торговою назвою Aculyn 2051, INCI: Sodium Polyacrylate (and) Dimethicone (and) Cyclopentasiloxane (and) Trideceth-6 (and) PEG/PPG-18/18 Dimethicone. У складі обох косметичних продуктів використано консервант Nipaguard PE 9010, який є ефективною комбінацією фенокситанолу та етилгексилгліцерину [1]. Він забезпечує широкий спектр антимікробної дії та стабільність продукту, підходить для створення емульсійних систем, не викликає подразнень і сенсibiлізації шкіри. Nipaguard PE 9010 дозволений до використання в натуральних та органічних формулах, оскільки не містить парабенів і формальдегіду. Цей консервант має високу стабільність у широкому діапазоні рН, підходить для одержання емульсійних косметичних систем без нагрівання.

Етапи виготовлення крему № 1 відбувались послідовно та ретельно. Спочатку було підготовлено фазу А. Етап включав розчинення гіалуронової кислоти у воді з подальшим додаванням емульгатора. У результаті цього утворювалась густа прозора емульсійна суміш. Далі під час безперервного перемішування повільно вводили фазу В. Утворена маса поступово біліла, набуваючи характерної кремоподібної структури. Потім додавали фазу С, вводили кожен компонент окремо, ретельно перемішували після кожного додавання складників. Завершальним етапом було внесення фази D, яку також додавали поступово під час перемішування, забезпечуючи однорідність та стабільність кінцевого продукту.

Крем № 2 виготовлено за традиційною гарячою технологією емульгування [2]. У рецептурі використовувались ті ж компоненти, що й для крему № 1, замінені були лише емульгатори холодної дії.

Таблиця 1

Характеристики компонентів емульсійних косметичних систем

Компонент	Склад / хімічна формула	Походження / токсичність	Функціональна дія
Мигдальна олія	Тригліцериди олеїнової кислоти, тригліцериди лінолевої кислоти, тригліцериди пальмітинової кислоти, фітостероли, токоферол, амігдалін, вітаміни групи В, А, Е, D	Природне / не токсична	Живлення, пом'якшення, регенерація (олійна фаза)
Олія ши	Олеїнова, стеаринова, ліолева та ліноленова кислоти	Природне / не токсична	Зволоження, відновлення, антиоксидант (олійна фаза)
Олія жожоба	Кислота гадолеїнова, ерукова, олеїнова, нервонова, пальмітинова, пальмітолеїнова, бегенова, ефіри жирних кислот, амінокислоти, колаген, вітамін Е	Природне / не токсична	Захист, зволоження, покращення бар'єру шкіри (олійна фаза)
Олія авокадо	Гліцериди олеїнової, лінолевої, пальмітинової, альфалінолевої жирних кислот, лецитин, фітостерини, вітаміни А, В, D, Е, Н, К	Природне / не токсична	Живлення, відновлення, антиоксидант (олійна фаза)
Вода (дист.)	H ₂ O	Природне / не токсична	Зволоження, розчинник (водна фаза)
Бурштинова кислота	C ₄ H ₆ O ₄	Натуральне / не токсична	Відновлення клітин, активація метаболізму (актив)
Вітамін С	C ₆ H ₈ O ₆	Натуральне / не токсичний	Антиоксидант, освітлення шкіри (актив)
Вітамін Е	C ₃₁ H ₅₂ O ₃	Натуральне / не токсичний	Зволоження, захист (актив)
Церамід	Вода, фосфоліпід, сфінголіпіди	Штучне / не токсичний	Відновлення бар'єрних властивостей шкіри (актив)
Срібло (йони)	Ag ⁺	Штучне / не токсичне для людини, токсичне для бактерій, грибів, деяких інших мікроорганізмів	Антибактеріальна дія (актив)

Таблиця 2

Рецептури емульсійних косметичних продуктів

Фаза	Крем № 1 Компонент	Мас. %	Фаза	Крем № 2 Компонент	Мас. %
А	Вода	59		Вода	68
	Гіалуронова кислота	1		Гіалуронова кислота	1
	Aculyn 2051	5		Олія мигдалю	3
В	Олія мигдалю	5	В	Гідрогенізована олія ши	4
	Гідрогенізована олія ши	9		Олія жожоба	3
	Олія жожоба	5		Олія авокадо	3
	Олія авокадо	5		Olivem 1000	3
	Вітамін Е	1		Glyceryl Stearate	4
С	Бурштинова кислота (розчин 10 %)	1	С	Вітамін Е	1
	Вітамін С	1		Бурштинова кислота (розчин 10 %)	1
	Церамід	2		Вітамін С	1
	Срібло (йони)	5		Церамід	2
	Срібло (йони)	5		Срібло (йони)	5
D	Nipaguard PE 9010	1			

Як останні додавали Olivem 1000 (INCI: Cetearyl Olivat, Sorbitan Olivat) та Glyceryl Stearate. Вони є емульгаторами прямої дії, що відповідає технології та типу емульсійної системи.

Етапи виготовлення крему № 2 передбачали нагрівання фази А та В до температури близько 70 °С. Це забезпечувало повне розчинення компонентів фази А та розплавлення речовин фази В. Після досягнення однакової температури обидві фази були об'єднані шляхом введення фази В у фазу А за умови інтенсивного перемішування. Після часткового охолодження суміші (40 °С) поступово додавали фазу С. Кожен компонент вводили окремо з ретельним та рівномірним перемішуванням. Завершальним етапом було додавання фази D, яку також інтенсивно перемішували до утворення однорідної стабільної емульсії.

Для забезпечення належного рівня гомогенізації косметичних емульсій застосовано ультразвукову обробку [1–3]. Кожну композицію обробляли ультразвуком. Він сприяв значному зменшенню розміру крапель дисперсної фази, що покращило стабільність емульсійної системи, зменшило ризик розшарування та позитивно вплинуло на текстуру кінцевого продукту. Крім того, ультразвукова обробка забезпечила високу однорідність, надала кремам гладкої, щільної та приємної консистенції, а також зменшила потребу в додатковій механічній обробці. Ультразвук є ефективним методом для отримання тонкодисперсних емульсій, що особливо актуально при виготовленні косметичних засобів з високими вимогами до стабільності та зовнішнього вигляду [4].

У результаті порівняння двох косметичних продуктів встановлено, що перший (крем № 1) має більш ніжну, легку та водну консистенцію, яка створює особливо приємні тактильні відчуття при нанесенні. Незважаючи на менший відсоток водної фази, цей продукт сприймається не таким олійним як другий (крем № 2).

Косметичний продукт, виготовлений за другою рецептурою (крем № 2), характеризується щільнішою, густішою текстурою, що візуально та на

дотик справляє враження більшої насиченості та живильності. Однак обидва креми мають приємні сенсорні властивості, не залишають липкості або залишкового шару на шкірі, добре вбираються, створюють відчуття комфорту та ніжності при використанні.

Основна відмінність між одержаними зразками полягає в консистенції та суб'єктивному сприйнятті рівня жирності, що дозволяє адаптувати кожну рецептуру під різні типи шкіри або відповідні потреби користувачів.

За оцінюванням органолептичних властивостей [2] одержані косметичні продукти мають приємний натуральний запах, однорідну структуру без ознак розшарування та утворення грудочок, легко наносяться й рівномірно розподіляються по шкірі.

Основні фізико-хімічні показники [8; 9] емульсійних косметичних продуктів, які характеризують їх якість та безпесність використання, наведено у таблиці 3.

pH першої косметичної системи знаходиться в межах допустимої норми [8], другої – значення 3,4 є низьким, занадто кислотним для шкіри [2]. Після коригування кислотності другого косметичного продукту pH для нього набуло нормованої величини – 5,3.

За колоїдною стабільністю та термостабільністю крем № 1 – стабільний, за першим показником (після центрифугування [8; 9]) крем № 2 – не стабільний, для нього спостерігається розшарування, яке зростає з часом зберігання цього косметичного продукту.

Висновки. Встановлено, що тип емульгатора та метод приготування емульсійної системи мають важливе значення для її консистенції, однорідності та зовнішнього вигляду, а значить – для текстури, стабільності та сенсорних характеристик готового косметичного продукту.

Показано, що холодна технологія емульгування має високу ефективність, дозволила отримати стабільний крем з приємними тактильними властивостями без потреби нагрівання, що є особливо важливим при використанні термолабіль-

Таблиця 3

Фізико-хімічні показників емульсійних косметичних продуктів

Назва показника / Нормоване значення	Косметичні продукти	
	Крем № 1	Крем № 2
pH / 5,0–9,0	5,5	3,4 (після коригування 5,3)
Колоїдна стабільність / Стабільна система	стабільна система	не стабільна система
Термостабільність / Стабільна система	стабільна система	стабільна система

них активних компонентів. Гаряче емульгування виявилось менш ефективним у забезпеченні тривалої стабільності, особливо за умов зберігання та механічного стресу емульсійного косметичного продукту.

Застосування ультразвукової обробки підтвердило свою ефективність як альтернативного методу високошвидкісного перемішування, значно покращуючого гомогенність та стабільність емульсійних косметичних систем.

Список літератури:

1. Пешук Л.В., Бавіка Л.І., Демідов І.М. Технологія парфумерно-косметичних продуктів. К. : Центр учбової літератури, 2007. 376 с.
2. Технологія косметичних засобів: Навч. посіб. для студ. фармацев. спец. вищих навчальних закладів / О.Г. Башура та ін. Вінниця : Нова книга, 2007. 360 с.
3. Федоровська М.І. Технологія лікарських косметичних засобів: методичні рекомендації до лабораторних занять. Луцьк : П «Зоря-плюс» ВОО ВОІ СОІУ, 2022. 39 с.
4. Єфімова В.Г., Пилипенко Т.М., Нікора О.В., Невпряга П.Ю. Розробка рецептури емульсійного косметичного продукту на основі колоїдних закономірностей. *Технічні науки та технології*. 2018. № 1 (11). С. 178–187.
5. Пилипенко Т.М., Невпряга, П.Ю. Основні діючі речовини та застосування екстракту зеленої кави. *Хімічні проблеми сьогодення: XX Міжнародна (XII Українська) наук. конф. Студ., аспірантів і молодих учених (Вінниця, 19–21 березня 2019р.)*. Вінниця, 2019. С. 37.
6. Мансурова А.В., Пилипенко Т.М. Зволожувачі у складі композиційних систем. *Динаміка, рух та розвиток сучасної науки: матеріали міжнар. студ. наук. конф. (Луцьк, 05 березня 2021р.)*. Луцьк, 2021. С. 46–47.
7. Пилипенко Т.М., Рябчун Ю.В., Єфімова В.Г. Дослідження якості косметичних кремів для рук. *Технічні науки та технології*. 2017. № 4 (10). С. 210–216.
8. ДСТУ 4765:2007. Креми косметичні. Загальні технічні умови. К. : Держспоживстандарт України, 2008. 7 с.
9. Пилипенко Т.М., Єфімова В.Г., Хрокало Л.А., Воробйова В.І. Хімічні методи аналізу харчових добавок та косметичних засобів: Лабораторний практикум: навч. Посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Хімічні технології косметичних засобів та харчових добавок» спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 72 с.

Pylypenko T.M., Yefimova V.G., Yednak A.Yu. DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS AND STUDY OF EMULSION COSMETIC PRODUCTS

The article is devoted to the formulation and investigation of emulsion cosmetic products. The type of emulsifier and the chosen method of preparing the oil-in-water emulsion are decisive for the consistency, homogeneity, and appearance of the cosmetic system. They largely influence the texture, stability, and sensorial properties of the finished product. One cosmetic product (Cream № 1) was manufactured by a cold-emulsification method, without heating. This became possible thanks to the incorporation into the formulation of oils (hydrogenated shea oil, sweet-almond oil, jojoba oil, avocado oil) that do not require melting, together with cold-process emulsifiers marketed under the trade name Aculyn 2051, INCI: Sodium Polyacrylate (and) Dimethicone (and) Cyclopentasiloxane (and) Trideceth-6 (and) PEG/PPG-18/18 Dimethicone. The second cosmetic product (Cream № 2) was produced by the traditional hot-emulsification technology. Its formulation employed Olivem 1000 (INCI: Cetearyl Olivat, Sorbitan Olivat) and Glyceryl Stearate, both of which are direct oil-in-water emulsifiers. Both cosmetic products were preserved with Nipaguard PE 9010, an effective combination of phenoxyethanol and ethylhexylglycerin. It provides broad-spectrum antimicrobial protection and product stability and is suitable for use in emulsion systems. It was established that the cold-emulsification technology is highly efficient. It enabled the production of a stable composition with pleasant tactile properties without the need for heating, which is particularly important when thermolabile active ingredients are used. Hot emulsification proved less effective in ensuring long-term stability, especially under storage conditions and mechanical stress on the cosmetic system. The article demonstrated the effectiveness of ultrasonic treatment as an alternative method for high-speed mixing of the obtained emulsion systems. Ultrasonic processing significantly improves the homogeneity and stability of cosmetic products. The obtained results confirm the importance of a rational choice of technological approach for obtaining modern emulsion cosmetic products with improved characteristics.

Key words: formulation, cosmetic product, cream, emulsifier, emulsion, emulsification, stability, efficiency.

Дата надходження статті: 07.06.2025

Дата прийняття статті: 14.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Столяренко Г.С.

Черкаський державний технологічний університет

Коваль М.Г.

Черкаський державний технологічний університет

Солодовнік Т.В.

Черкаський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ МЕМБРАН ПРИ ОБЕЗСОЛЮВАННІ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД

Технологія зворотноосмотичної демінералізації морських вод супроводжується утворенням біологічних відкладень на мембранах. Тому, обробка високомінералізованих вод перед їх застосуванням в мембранних установках є актуальним питанням сьогодення. В статті запропоновано застосовувати попередню обробку води, використовуючи електроактивацію в якості ефективного комплексного процесу демінералізації, яка додатково супроводжується очищенням води від органічних речовин та перешкоджає утворенню біологічних відкладень на мембранах. За експериментальними даними було визначено вплив електрохімічної дії на склад високомінералізованих вод та запропонована схема стендової лабораторної установки для очищення води методом електроактивації. В якості основної ємкості в даній схемі використовували розроблену конструкцію демінералізатору, яка є проточною та безперервної дії з електродами особливої конструкції, що дозволяє очищувати 3 м³/годину морської мінералізованої води. Попереднє опріснення морської води перед її застосуванням в установках зворотного осмосу проводили при наступних технологічних параметрах: густина струму 1,0–1,5 А/дм², кількість електрики змінювали від 2,5 до 5,1 кВт·год/м³. Встановлено, що застосування методу електроактивації для морської води, яка була відібрана з Чорного моря в районі Тилігульського лиману, дає можливість для досягнення високого ступеня (в межах від 45 до 70% (вміст іонів та загальний солевміст) її очищення при первинній демінералізації. У статті проведено дослідження способу досягнення мінімізації енергетичних витрат в технології демінералізації морських вод. На стадії попереднього опріснення води та перед її надходженням до мембранної системи було досягнуто зниження витрат електроенергії в межах 35–40%. Доведено, що солевміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах.

Ключові слова: високомінералізовані води, електроактивація, відкладення у мембранах, демінералізація, опріснювачі, зворотний осмос, ступінь очищення.

Постановка проблеми. Для демінералізації води близько 90% сумарної продуктивності опріснювачів у світі забезпечується дистиляційними одно-, багатоступінчастими та термокомпресійними установками. Дистиляційний метод є енергоємним, тому застосування дистиляційних установок доцільно в тих регіонах, які мають для цього достатні енергоресурси. Також для демінералізації води використовується заморожування та зворотний осмос. Ці методи ефективні для води з солевмістом більше 10000 мг/дм³, а при меншому

солевмісті (2000–3000 мг/дм³) до використання рекомендується іонообмінний метод. Метод електродіалізу є ефективним в діапазоні концентрацій солей від 2500 до 10000 мг/дм³. Найбільш складним вузлом в технологічних процесах вилучення солей є зниження вмісту таких іонів як CO₃²⁻, SO₄²⁻ та Cl⁻ з концентрацією 21000–25000 мг/дм³ до концентрації 2500 мг/дм³. Ці процеси є надзвичайно енергоємними та доволі коштовними. Морські води, загальний солевміст яких коливається в межах 8000–18000 мг/дм³, потребують

знесолення перед використанням в технологічних процесах. За останнє століття були розроблені численні методи опріснення морської та солонуватої води, найбільш ефективними серед них є мембранні технології. Однак, на даний час, технологія зворотного осмосу стикається з такими проблемами, як забруднення (колоїдне, органічне та біобруднення) та утворення накипу, які виникають внаслідок високої концентрації солей та забруднюючих речовин у воді. Накип на поверхнях мембран скорочує термін їх служби, зменшує потік води та збільшує споживання енергії, що вимагає частого очищення та призводить до скорочення терміну служби мембран [1]. Тому, актуальним питанням сьогодення є розробка ефективних методів попередньої демінералізації морської води для подальшого її опріснення в мембранних установках з метою зменшення негативного впливу на мембранні модулі. Одним з таких методів є проведення попередньої обробки морської води з використанням електроактивації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі приділяється багато уваги питанню дослідження мембран після їх використання для опріснення вод широкого кола мінералізації. Проведене авторами [1] дослідження допомагає в з'ясуванні складу обростання мембран за низьких температур та надає орієнтир для розробки методів попередньої обробки мінералізованої води. В роботі [2] досліджувався вплив робочих умов на продуктивність процесу зворотного осмосу при різних рівнях забруднення. Авторами доведено, що забруднення мають значний вплив на швидкість потоку пермеату, солоність та питоме споживання електроенергії та при високому рівні забруднення продуктивність зворотного осмосу можна збільшити до цільового значення, регулюючи тиск та температуру сировини. Авторами [3] розроблено математичну модель для оптимізації продуктивності опріснення при застосуванні зворотного осмосу для солонуватої воді із середньою та високою концентраціями солі з використанням методології поверхні відгуку та штучної нейронної мережі, яка була розроблена спеціально для ефективної роботи систем опріснення. У статті [4] пропонується використання періодичного процесу зворотного осмосу з використанням осмотичного зворотного промивання, реверсу потоку подачі та циклічного змінення солоності. Авторами статті надані рекомендації щодо напрямків дослідницької діяльності для подальшого вдосконалення технології періодичного процесу зворотного осмосу. Науковці [5] пояснюють яким чином

відбувається забруднення мембран та вказують на те, що забруднення можна розділити на внутрішні або зовнішні залежно від місця їх розташування. У статті [6] доведено, що забруднення мембран призводить до кількох негативних наслідків для систем зворотного осмосу, включаючи зниження продуктивності, погіршення якості води, збільшення експлуатаційних витрат, вимоги до вищого тиску, збільшення часу очищення мембран та скорочення терміну служби.

Аналізуючи наукові роботи дослідників різних країн, встановлена така закономірність, що основна проблема, яка виникає при застосуванні зворотного осмосу для опріснення вод різного ступеню мінералізації – це проблема забруднення мембран сполуками неорганічного походження та їх обростання різного типу органічними речовинами [7, 8].

У багатьох оглядових статтях, які стосуються технологій опріснення води, приділяється увага дослідженню стану опріснення води у світі, тобто аналізу кількості існуючих опріснювальних установок, технологій, що використовуються на цих установках. Автори зосереджують особливу увагу на технологічних аспектах, включаючи, серед іншого, потреби в енергії, типовий розмір та вартість найпопулярніших технологій опріснення [9, 10, 11]. У статтях [12, 13] проведено детальний огляд принципів роботи та параметрів продуктивності кількох технологій опріснення, але не вказано про найбільш ефективні технології попередньої обробки високомінералізованої та солонуватої води перед її очищенням в системах зворотного осмосу. У роботі [14] проведено оптимізаційний аналіз основних експлуатаційних витрат на процеси демінералізації води Чорного моря. Показано, що двоступеневий зворотний осмос з використанням мембран середньої та низької щільності, може бути успішно використаний для демінералізації, що дозволяє знизити основні експлуатаційні витрати на 15–28%.

Авторами [15] пропонується проведення попереднього макро- та мікрмасштабного моделювання процесу зворотного осмосу. Наголошується на важливості використання обчислювальної гідродинаміки як перспективного інструменту моделювання, що може повністю охопити всі явища, пов'язані зі забрудненням мембран. В роботі [16] авторами пропонується безпосереднє нанесення мікробульбашок на поверхню мембрани як перспективний підхід до управління міжфазним забрудненням шляхом безперервної фізичної взаємодії. Автори доводять, що процес регенерації на основі мікробульбашок є стабільним та повторю-

ваним впродовж 10 циклів, а також високоефективним для проблемної води. В роботі [17] автори рекомендують проводити попереднє очищення води шляхом додавання до мембранного реактора підсилювачів зменшення забруднення, таких як адсорбенти та флокулянти, що може ефективно зменшити забруднення мембран. У статтях [18, 19] автори наголошують на тому, що ефективна система попереднього очищення є основою будь-якої технології опріснення. А вибір етапів попередньої обробки визначається такими критеріями, як тип матеріалу мембрани, якість води, частота очищення мембрани та коефіцієнт відновлення.

Отже, при огляді та аналізі наукових статей багатьох вчених щодо практичного використання електроактивації води у рослинництві, біотехнології, харчовій промисловості [20, 21, 22], в сільському господарстві [23, 24], питання попереднього очищення високомінералізованих та солонуватих вод є актуальним. Науковці робочої групи кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету проводили дослідження щодо використання електроактивації високомінералізованих вод перед їх використанням в зворотноосматичних системах очищення води.

Постановка завдання. Метою статті є вивчення процесів попередньої електрохімічної активаційної обробки морської води для зниження солемісту на одній сходинці в межах від 45 до 50% та для запобігання утворення відкладень на мембранах при фінішній стадії демінералізації, розробка лабораторного демінералізатору та схеми технологічного процесу комплексного очищення високомінералізованих вод.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження була вода, відібрана з Чорного моря в районі Тилігульського лиману (Одеська область, Україна), склад якої представлено в таблиці 1. Аналіз вихідної води на вміст іонів проводили відповідно стандартних методів [25], а саме: іони Ca^{2+} та Mg^{2+} визначали комплексонометричним методом; хлориди визначали аргенометричним титруванням; іони Na^+ та K^+ визначали потенціометричним методом з використанням іон-селективних електродів (іонімір І-160 МІ); сульфати визначали гравіметричним осадженням іонів у вигляді осаду BaSO_4 ; для визначення іонів

HCO_3^- використовували кислотно-основне титрування. Як відомо, вода характеризується двома важливими фізичними показниками: рН (водневим показником) і окисно-відновним потенціалом ОВП (або редокс-потенціалом Red-Ox) [26]. Визначення рН проводили потенціометричним методом при використанні іоніміру І-160 МІ (для вихідної досліджуваної води рН=7,5). Визначення ОВП визначали за допомогою кондуктометру лабораторного МР 521 з використанням пластикового комбінованого електроду 201Т-М рН/АТС (для вихідної досліджуваної води ОВП=230 мВ).

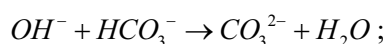
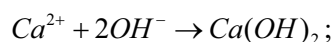
Наближений розрахунок загальної мінералізації вихідної води знаходили за формулою: $S = \sum C = 9430 \text{ мг/дм}^3$. Більш точно загальну мінералізацію води (TDS) знаходили при використанні кондуктометру лабораторного МР 521 з використанням пластикового комбінованого електроду 201Т-М рН/АТС (для вихідної досліджуваної води TDS = 9507 мг/дм³).

Ступінь очищення води (X, %) розраховували за формулою:

$$X = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \cdot 100\%$$

де c_0 і c_1 – вихідна і кінцева концентрації, відповідно, мг/дм³.

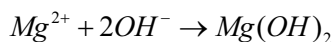
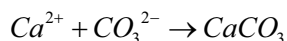
Електрохімічна активація – це фізико-хімічний процес, сукупність здійснених в умовах мінімального виділення тепла електрохімічного та електрофізичного впливів на воду (з іонами, що знаходилися в ній, і молекулами розчинених речовин) в зоні просторового заряду на поверхні електродів. При цьому досягається нерівноважний стан у системі за рахунок переносу заряду через межу «електрод-мембрана-електроліт». Однією з переваг методу є спрямований рух гідроксид-іонів в електроактиваторі. При використанні проникних мембран гідроксид-іони, що утворилися, не асоціюються з катіонами Гідрогену, а підвищують рН катодного розчину до 10–12. При цьому досягається 70–80% виходу за струмом із зниженням жорсткості води. Під впливом вільних гідроксид-іонів можливе протікання декількох конкуруючих реакцій в катодній області:



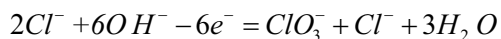
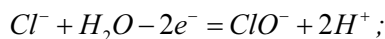
Таблиця 1

Концентрація іонів у воді, відібраної з Чорного моря в районі Тилігульського лиману

Іони	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
C, мг/дм ³	370	915	4389	430	1568	1502	256



Присутність іону Cl^- приводить до утворення ряду окисеновмісних іонів за відомим механізмом електродних реакцій біля аноду:



В анодному просторі електроактиватора рН знижується та середовище стає кислим. Величина рН та значення ОВП впливають на фізико-хімічні та біохімічні процеси, які відбуваються при видаленні з води забруднювачів. Так в процесі окиснення, відновлення, дисоціації або комплексоутворення та регулюванням рН, можна змінити ОВП, напрямом та швидкість хімічних реакцій, окисно-відновну активність речовин в розчині, стійкість комплексних сполук, а при біохімічному очищенні води – гальмувати життєдіяльність бактерій та змінювати каталітичну активність ферментів. Електрохімічна активація також призводить до знезаражування води, так як у розчині натрій хлориду утворюється аніон гіпохлориду, що сприяє процесу очищення. Зниження вмісту органічних сполук можна пояснити їх співосадженням на колоїдних частинках у катодній області та з частковим окисненням розчинених органічних речовин на аноді. Таким чином, електрохімічний метод очищення є універсальним методом попередження коагуляції

сульфатних відкладень в технологічному обладнанні а також перешкоджає біообростанню технологічних елементів, що, в свою чергу, може бути ефективним при подальшому знесоленні води з використанням зворотноосмотичних мембран. До переваг методу можна віднести: можливість його використання в присутності органічних сполук; заміна напівпроникних перегородок на проникні; простота конструкції та можливість її удосконалення; мінімізація витрат та можливість видалення солей у вигляді осаду [27].

Для дослідження ефективності використання хімічної електроактивації з метою попередньої демінералізації морської води, загальна мінералізації якої складає 9430 мг/дм^3 , розроблено та використано для дослідження стендову експериментальну лабораторну установку електроактивації, яка зображена на рисунку 1. В якості основної ємкості, використовували лабораторний демінералізатор (2), спроектований в науковій лабораторії кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету. Фото лабораторного демінералізатора представлено на рисунку 2.

Лабораторний демінералізатор безперервної дії є проточним, має електроди особливої конструкції, що дозволяє очищувати $3 \text{ м}^3/\text{годину}$ морської мінералізованої води. З метою видалення грубодисперсних речовин, досліджувану воду попередньо фільтрували крізь паперовий складчастий фільтр.

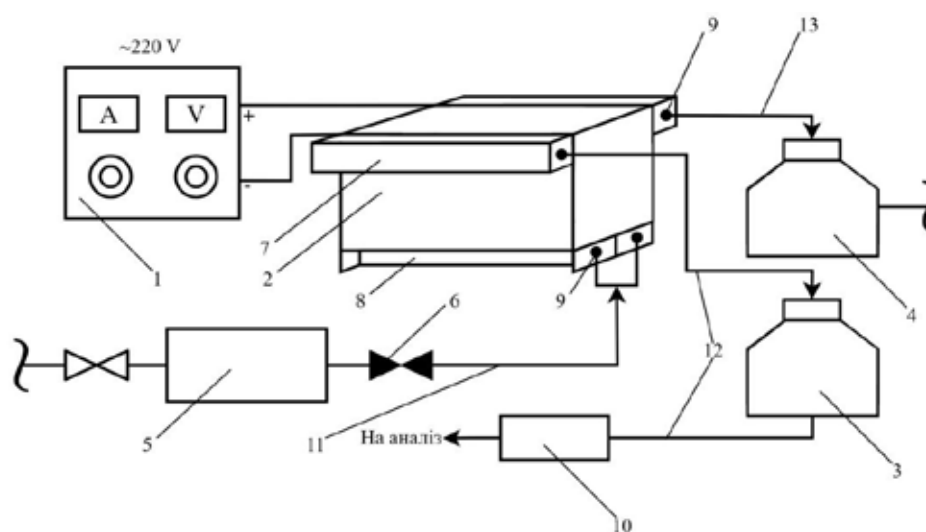


Рис. 1. Схема стендової лабораторної установки для очищення води методом електроактивації:
1 – блок живлення; 2 – основна ємкість – демінералізатор; 3 – ємкість для католіту;
4 – ємкість для аноліту; 5 – ємкість з досліджуваною водою; 6 – кран; 7 – камера для відводу води;
8 – камера для підводу води; 9 – штупер; 10 – відстійник води для аналізу



а)



б)

Рис. 2. Фото лабораторного демінералізатора:
а – загальний вигляд; б – вид з боку відведення рідких продуктів електроактивації

Попереднє опріснення морської води, склад якої представлено в таблиці 1, проводили при наступних технологічних параметрах: густина струму 1,0–1,5 А/дм², кількість електрики відповідно дослідів (в кВт·год/м³): № 1 – 2,5; № 2 – 3,8; № 3 – 5,1.

Отримані результати, представлені в таблиці 2, свідчать, що застосування методу електроактивації води сприяє досягненню високого ступеня очищення при первинній демінералізації. Експериментально встановлено, що солеміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах. За результатами серії проведених дослідів (табл. 2) встановлено, що оптимальними умовами для ефективного опріснення вихідної морської води є: густина струму 1,0–1,5 А/дм²; кількість електрики 5,1 кВт·год/м³.

Спостерігаються зміни у значеннях рН та ОВП, а саме: після проведення електроактивації морської води рН=8,0 а ОВП = -202 мВ. Отримані

дані доводять, що солеміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах. Отримані результати попереднього очищення води наведені в таблиці 3.

Висновки. Запропоновано застосовувати попередню обробку морської води, використовуючи електроактивацію в якості ефективного комплексного процесу демінералізації. Встановлено, що електроактивація сприяє очищенню води від органічних речовин та перешкоджає утворенню біологічних відкладень на мембранах. Вперше створена схема стендової лабораторної установки для ефективного очищення води методом електроактивації. Розроблена конструкція проточного демінералізатору безперервної дії з електродами особливої конструкції. Експериментально встановлено, що застосування розробленого демінералізатору дозволяє очищувати 3 м³/годину морської мінералізованої води. Встановлені ефективні технологічні параметри для попереднього опріснення морської води перед її застосуванням в установках

Таблиця 2

Результати ступеня очищення морської води

Показники, які вимірювались	Ступінь очищення води X, %		
	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
TDS, мг/дм ³	45,3	50,64	68,22
С, (Na ⁺), мг/дм ³	48,05	67,21	74,15
С, (K ⁺), мг/дм ³	76,06	78,40	80,10
С, (SO ₄ ²⁻), мг/дм ³	40,4	54,89	56,22
С, (Cl ⁻), мг/дм ³	49,28	58,61	58,99
С, (HCO ₃ ⁻), мг/дм ³	80,40	81,60	87,00
С, (Ca ²⁺), мг/дм ³	69,70	69,50	70,45
С, (Mg ²⁺), мг/дм ³	56,30	58,12	60,11

Результати попереднього очищення води методом електроактивації*

Показники, які вимірювались	Вихідна морська вода	Вода після очищення методом електроактивації	Ступінь очищення води X, %
TDS, мг/дм ³	9430	2997,08	68,22
C, (Na ⁺), мг/дм ³	4389	1097	74,15
C, (K ⁺), мг/дм ³	430	86	80,10
C, (SO ₄ ²⁻), мг/дм ³	1502	660,9	56,22
C, (Cl ⁻), мг/дм ³	1568	642,9	58,99
C, (HCO ₃ ⁻), мг/дм ³	256	33,28	87,00
C, (Ca ²⁺), мг/дм ³	370	111	70,45
C, (Mg ²⁺), мг/дм ³	915	366	60,11

*Електроактивацію води проводили впродовж 60 хвилин

зворотного осмосу. Експериментально доведено, що солеміст у вихідній морській воді суттєво знижується і процес попередньої підготовки води

методом електроактивації є таким, який можна рекомендувати для використання в промислових масштабах.

Список літератури:

1. Li Z.H, Ni G.W., Wang J.L., Zhou L., Yang Q., Li P.Z., Gao A.L., Yu T., Cheng L.H., Bi X.J. Fouling characteristic of reverse osmosis membrane for reclaimed water treatment operating under cold winter condition. *Desalination*. 2023. Volume 549. 116309. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116309.
2. Shouman L.A., Afify R.M., Fadel D.A., Esawy M.H. Fouling effect on Reverse Osmosis (RO) membranes performance in desalination plant. *Desalination and Water Treatment*. 2024. Volume 319. 100502. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100502.
3. Wang P., Sun X., Wu X., Gao Y., Yang F. Yu., Optimizing reverse osmosis desalination from brackish waters: Predictive approach employing response surface methodology and artificial neural network models. *Journal of Membrane Science*. 2024. Volume 704. 122883. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122883.
4. Burlace L., Davies P.A., Fouling and fouling mitigation in batch reverse osmosis: review and outlook. *Desalination and Water Treatment*. 2022. Volume 249. P. 1-22. DOI: 10.5004/dwt.2022.28103.
5. Kuberkar V.T, Davis R.H. Modeling of fouling reduction by secondary membranes. *Journal of Membrane Science*. 2000. Volume 68. P. 243-258. DOI: 10.1016/S0376-7388(99)00324-5.
6. Ahmed M.A., Amin S., Ashraf A.M. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon*. 2023. Volume 9. Issue 4, e14908. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14908.
7. Matin A., Laoui T., Falath W., Farooque M. Fouling control in reverse osmosis for water desalination & reuse: Current practices & emerging environment-friendly technologies. *Science of The Total Environment*. 2021. Volume 765. 142721. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142721.
8. Nthunya L.N., Bopape M.F., Mahlangu O.T., Mamba B.B., Van der Bruggen B., Quist-Jensen C.A, Richards H., Fouling, performance and cost analysis of membrane-based water desalination technologies: A critical review. *Journal of Environmental Management*. 2022. Volume 301. 113922. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113922.
9. Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V., Kang, S.M. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Sci. Total Environ*. 2019, Volume 657. P. 1343-1356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
10. Mika, Łukasz, Karol Sztékler, Tomasz Bujok, Piotr Boruta, and Ewelina Radomska. Seawater Treatment Technologies for Hydrogen Production by Electrolysis. A Review. *Energies*. 2024. Volume 17(24):6255. DOI: 10.3390/en17246255.
11. Shahzad, M.W., Burhan, M., Ang, L., Ng, K.C. Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*. 2017. Volume 413. P. 52-64. DOI: 10.1016/j.desal.2017.03.009.
12. Curto D., Franzitta V., Guercio A. A review of the water desalination technologies. *Appl. Sci*. 2021. Volume 11. Issue 2. 670. DOI: 10.3390/app11020670.
13. Panagopoulos, A. Water-energy nexus: desalination technologies and renewable energy sources. *Environ Sci Pollut Res*. 2021. Volume 28., P. 21009-21022. DOI: 10.1007/s11356-021-13332-8.
14. Fendri F., Mitchenko T., Maletskyi Z. Optimization of the reverse osmosis seawater demineralization technologies for a power producing industry. *Desalination and Water Treatment*. 2011. Volume 25. Issue 1-3. P. 84-90. DOI: 10.5004/dwt.2011.1832.

15. Najid N., Hakizimana J.N., Kouzbou S., Gourich B., Ruiz-García A., Vial C., Stiriba Y., Semiat R. Fouling control and modeling in reverse osmosis for seawater desalination: A review. *Computers & Chemical Engineering*. 2022. Volume 162. 107794. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107794.
16. Yun E.T., Lee J., Lee S.S., Hong S., Fortner J.D. Harnessing the potential of in-situ, electrically generated microbubbles via nickel foam for enhanced, low energy membrane fouling control. *Water Research*. 2024. Volume 249. 120886. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120886.
17. Sohn W., Guo W., Ngo H.H., Deng L., Cheng D., Zhang X. A review on membrane fouling control in anaerobic membrane bioreactors by adding performance enhancers. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Volume 40. 101867. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101867.
18. ai Y., Wu J., Shi S. Q., Li J., Kim K.H. Advances in desalination technology and its environmental and economic assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Volume 397. 136498. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136498.
19. Seongpil Jeong, Yonghea Park, Seockheon Lee, Janghong Kim, Kwanhyung Lee, Jeawoo Lee, Hyo-Taek Chon. Pre-treatment of SWRO pilot plant for desalination using submerged MF membrane process: Trouble shooting and optimization. *Desalination*. 2011. Volume 279. Issues 1-3. P. 86-95. DOI: 10.1016/j.desal.2011.05.064
20. H. Chahinez, O. Incerti, G. Celano, M. Desopo, A. Ippolito, and S. Marianna Sanzani. Electrolyzed salt solutions used against major postharvest diseases of fresh fruit and vegetables. *Foods*. 2024. Volume 13. Issues 16: 2503. DOI: 10.3390/foods13162503.
21. Aider M., Gnatko E., Benali M., Plutakhin G., Kastyuchik A., Electro-activated aqueous solutions: Theory and application in the food industry and biotechnology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2012. Volume 15. P. 38-49. DOI: 10.1016/j.ifset.2012.02.002.
22. Adal S., Kıyak B.D., Koç G.Ç., Süfer Ö., Karabacak A.Ö., Çinkır N.İ., Çelebi Y., Jeevarathinam G., Rustagi S., Pandiselvam R. Applications of electrolyzed water in the food industry: A comprehensive review of its effects on food texture. *Future Foods*. 2024. Volume 9. 100369. DOI: 10.1016/j.fufo.2024.100369.
23. Fabrizio K.A., Sharma R.R., Demirci A., Cutter C.N. Comparison of electrolyzed oxidizing water with various antimicrobial interventions to reduce Salmonella species on poultry. *Poultry Science*. 2002. Volume 81. Issue 10. P. 1598-1605. DOI: 10.1093/ps/81.10.1598.
24. Ромашенко М., Конаков Б., Поліщук В., Усатий, С. Електрохімічно активована вода (ЕХАВ): Історія відкриття, специфіка процесу, сучасний стан та перспективи її застосування в умовах зрошення. *Меліорація земель та водне господарство*. 2021. № 2. С. 177-189. DOI: 10.31073/mivg202102-291.
25. Солодовнік Т.В. Аналітична хімія: практикум. Черкаси, 2020. 308 с.
26. Маринін А., Шпак В, Пасічний В., Шубіна Є., Святненко Р. Вплив електрохімічно активованої води на функціонально-технологічні властивості та реологічні показники м'ясних паштетів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2023. № 2. Том 16. С. 79-85. DOI: 10.20998/2413-4295.2023.02.11.
27. Tayeh Y.A. A comprehensive review of reverse osmosis desalination: Technology, water sources, membrane processes, fouling, and cleaning. *Desalination and Water Treatment*. 2024. Volume 320. 100882. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100882.

Stolyarenko H.S., Koval M.G., Solodovnik T.V. RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF MEMBRANES IN THE DESALIZATION OF HIGHLY MINERALIZED WATERS

The technology of reverse osmosis demineralization of seawater is accompanied by the formation of biological deposits on membranes. Therefore, the treatment of highly mineralized waters before their use in membrane plants is a pressing issue today. The article proposes to apply preliminary water treatment using electroactivation as an effective complex demineralization process, which is additionally accompanied by water purification from organic substances and prevents the formation of biological deposits on membranes. According to experimental data, the influence of electrochemical action on the composition of highly mineralized waters was determined and a scheme of a bench laboratory installation for water purification by electroactivation was proposed. As the main tank in this scheme, the developed design of the demineralizer was used, which is a flow-through and continuous operation with electrodes of a special design, which allows purifying 3 m³/hour of seawater mineralized water. The preliminary desalination of seawater before its use in reverse osmosis plants was carried out at the following technological parameters: current density 1.0–1.5 A/dm², the amount of electricity varied from 2.5 to 5.1 kW·h/m³. It was established that the use of the electroactivation method for seawater, which was taken from the Black Sea in the area of the Tiligul estuary, makes it possible to achieve a high degree (in the range from 45 to 70% (ion content and total salt content) of its purification during

primary demineralization. The article studies a method for achieving minimization of energy costs in the technology of demineralization of seawater. At the stage of preliminary desalination of water and before its entry into the membrane system, a reduction in electricity costs of 35-40% was achieved. It is proven that the salt content in the initial seawater is significantly reduced and the process of preliminary water preparation by the electroactivation method is one that can be recommended for use on an industrial scale.

Key words: *highlymineralized waters, electroactivation, membrane deposits, demineralization, desalination plants, reverse osmosis, degree of purification.*

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 09.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Чигиринець О.Е.

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

Мамренко О.С.

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

КОРОЗІЯ ТЕРМОДИFUЗІЙНОГО ЦИНКОВОГО ПОКРИТТЯ У ІМІТОВАНОМУ СІРКОВОДНЕВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті розглянуто питання стійкості цинкового покриття на нелегованій Ст10, отриманого термохімічним дифузійним методом, у розчині NACE TM 0284-2016, насиченому сірководнем, що імітує корозійні процеси обладнання у нафтогазовидобувній промисловості. Зазначено, що нафтогазовидобувна промисловість є металоемною галуззю, що пов'язано із великою оборотністю металофонду, а отже вимагає певних рішень для його захисту від корозії. Традиційно основним видом корозійного руйнування в нафтогазовидобувній промисловості є вуглекислотна корозія, яка протікає за впливу, головним чином, вуглекислого газу. Проте з кожним роком збільшується кількість свердловин, які забруднені мікроорганізмами, що додає до агресивних компонентів середовища ще й надзвичайно агресивний сірководень. Отже для зменшення витрат на обслуговування свердловин потрібні дієві способи захисту від корозії обладнання в умовах цього виробництва.

Широкий перелік методів захисту від корозії передбачає як перехід галузі на леговані сталі, так і інші методи, пов'язані з нанесенням покриттів на поверхню труб, що використовуються у нафтогазовидобувній промисловості. Проте, легований сортамент сталей має вищу вартість, що значно підвищує витрати на видобуток нафти та газу. Тому більш перспективним методом захисту від корозії є нанесення покриттів.

Показано, що серед великої кількості відомих методів захисту обладнання галузі цинкові покриття є одним із досить ефективних та менш високовартісних методів, що сприяє зменшенню витрат на заміну пошкодженого корозією металевого обладнання. Серед методів цинкування одним із перспективних є покриття, отримані хімотермічним способом в порошкових сумішах або термодифузійним методом, оскільки на відміну від інших вони мають найкращу адгезію до металевої поверхні в умовах високих швидкостей потоків рідин. Проаналізовано структуру та хімічний склад фаз, що складають структуру покриття, отриманого термодифузійним методом.

В роботі проведено оцінку стійкості металевих зразків Сталі 10 з цинковим термодифузійним покриттям до сірководневого окрихчення. Для випробувань зібрана установка, що дозволяє моделювати корозійні процеси в умовах нафтогазовидобувної промисловості із забрудненням сірководнем. Встановлено, що в розчині NACE TM 0284-2016 з насиченням сірководнем один із п'яти досліджених зразків сталі 10 без покриття після випробувань мав тріщину, що свідчить про високу вірогідність руйнування нелегованих сталей в умовах нафтогазовидобутку зі свердловин із сірководнем. Проте зразки з нанесеним термодифузійним методом цинкового покриття в цих умовах після 288 годин випробувань не мали ознак появи тріщин, що свідчить про підвищену стійкість цинкового покриття до сірководневого окрихчення. Дослідження металографічних шліфів зразків показали, що цинкове покриття протягом терміну прискорених випробувань в умовах сірководневого середовища схильне до хімічного розчинення зі зменшенням товщини покриття. Отримані дані свідчать про необхідність пошук шляхів підвищення стійкості цинкового шару шляхом отримання комбінованих покриттів.

Ключові слова: корозія, випробування, модельне середовище, цинкове термодифузійне покриття, сірководневе окрихчення.

Постановка проблеми. Під час видобування та транспортування нафти та газу використовуювані труби експлуатуються в основному в умовах впливу соляних розчинів, насичених вуглекислим газом та/або сірководнем, які при розчиненні утворюють відповідно вугільну та сірководневу кислоти. Тому металеві труби в таких агресивних умовах піддаються значному корозійному впливу, що впливає на термін їх експлуатації [1]. В Україні є позитивний досвід використання труб з термодифузійним цинковим покриттям в нафтогазовидобувній промисловості, який показав, що труби з таким цинковим покриттям досить успішно експлуатувалися протягом тривалого часу [2]. Причому зазначалося, що труби експлуатувалися в свердловинах, насичених переважно вуглекислим газом. Проте досвід експлуатації свердловин в інших країнах, де відбулося їх бактеріологічне забруднення, при якому продуктами життєдіяльності бактерій є сірководень, показав, що обладнання зазнає значних корозійних ушкоджень. Так, на Близькому Сході чимало родовищ нафти та природного газу багатих на сірководень, що класифікуються як «ультракислий газ», оскільки містить його понад 20%. Родовища кислого та ультракислого газу становлять понад 40% світових запасів природного газу і здебільшого зосереджені на Близькому Сході [3].

Сірководень є одним із найбільш агресивних корозійних агентів у нафтогазовій галузі. Він викликає сульфідне корозійне розтріскування під напругою, а також призводить до водневого окрихчення металу, що робить його крихким і схильним до тріщин [3]. Однак досвіду використання та широких досліджень стійкості термодифузійного цинкового покриття в умовах підвищеного вмісту сірководню дуже мало. Тому важливим питанням є визначення рівня протикорозійної стійкості та механізму захисту сталі обсадних, насосно-компресорних труб тощо з термодифузійним цинковим покриттям в умовах видобутку нафти та газу із сірководнем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Термодифузійне цинкове покриття (ТДЦП), яке отримується в порошкових сумішах, тривалий проміжок часу є одним із найбільш ефективних та економічно вигідних методів підвищення корозійної стійкості обладнання у різних галузях промисловості, де метал експлуатується у високо агресивних умовах. До таких галузей відносять нафтогазовидобувну промисловість, яка є металомісткою і потребує використання стійких металів та сплавів [3]. Звичайні нелеговані сталі не

можуть витримати високо агресивні умови експлуатації. Леговані сталі є досить високовартісними, тому їх останнім часом використовують все менше. Більша увага науковців спрямована на випуск сталей з покриттями, що дозволяє підвищити їх ресурс використання та здешевлює їх виробництво.

Серед великого різноманіття покриттів, які можуть бути реалізовані шляхом нанесення на поверхню сталі, заслуговують на увагу перш за все термодифузійні покриття, оскільки більшість органічних та неорганічних покриттів, нанесених на поверхню сталі, не витримують умов високих швидкостей потоків технологічних рідин. При нанесенні термодифузійних металевих покриттів метали здатні впроваджуватися у поверхневі шари металу на глибину до 20–50 мкм, що забезпечує значний рівень адгезійної міцності.

Серед металевих термодифузійних покриттів найбільшого використання здобули цинкові покриття завдяки своїй відносно низькій вартості самого матеріалу цинку, а також температурному режиму його нанесення, який сягає не вище 430–450°C, що є енергетично більш вигідним, ніж наприклад хромові покриття, де температурні режими для їх отримання сягають 1000°C і вище.

Дифузійні цинкові покриття не схильні до старіння, вони мають високу твердість, зносостійкість, а дифузійний зв'язок забезпечує високий ступінь зчеплення з поверхнею виробу. Однією з ключових відмінностей термодифузійного цинкового покриття від інших методів є формування на межі розділу «сталь-цинк» інтерметалідних фаз заліза та цинку (Fe-Zn сплавів) [4]. Ці фази мають високу твердість і хорошу адгезію до основного металу, що забезпечує чудову зносостійкість і довговічність покриття. Перевагою таких термодифузійних покриттів є можливість нанесення їх як на внутрішню, так і зовнішню поверхню труб, які використовуються при видобуванні нафти та газу. Рівномірність покриття дозволяє наносити його на складні поверхні, в тому числі на різьбові з'єднання, муфтові частини тощо [2]. Високий ступінь адгезії дозволяє витримувати абразивне зношування та кавітаційні руйнування.

Анодний механізм захисту цинкових покриття дозволяє ефективно боротися з різними видами корозії, в тому числі вуглекислотною, піттинговою та мікробіологічною корозією. Тому навіть за наявності незначних пошкоджень у покритті, цинк може продовжувати захищати сталь. Оскільки у термодифузійних покриттях склад поверхневих

шарів на сталі відрізняється від чистого цинку, тому ці покриття в різних корозійних середовищах будуть мати іншу поведінку.

На сьогодні вже відомі більш удосконалені процеси нанесення термодифузійного покриття, наприклад з рециркуляцією реактивної атмосфери, що є новим підходом у технологіях цинкування [5]. Ефективність нанесення підвищується за рахунок обертового руху реторти, в якій забезпечується постійний контакт поверхні оброблюваних виробів з активною порошковою сумішшю. Остання складається з цинкового порошку ZnO як наповнювача та NH_4Cl як активатора. Під час нагрівання порошкової суміші в реторті утворюються газоподібні продукти реакції, які рухаються до поверхонь, що покриваються [5]. Проте хімічні реакції, які при цьому відбуваються, принципово не змінні.

Опубліковані результати досліджень хімічного складу термодифузійних цинкових покриттів свідчать, що це покриття складається з декількох послідовно розташованих інтерметалідних фаз, які мають різний хімічний склад та фізико-механічні властивості [5–7]. Зростання шару розглядають як зростаючу зону дифузії бінарної дифузійної пари цинк/залізо, яка складається з усіх хімічних фаз, притаманних цій парі [5].

Зовнішній шар покриття складається в основному з чистого цинку, а саме η -фази. При тривалій витримці процесу нанесення покриття за умов високих температур, цей шар може бути дуже тонким або навіть відсутнім, оскільки весь цинк прагне дифундувати вглиб сталі. Оскільки це практично чистий цинк, то цей шар, як правило, є пластичним та має відносно низьку твердість в порівнянні з іншими інтерметалідними фазами, що утворюються в таких покриттях [5–7].

Під η -фазою формується ζ -фаза, хімічний склад якої відповідає FeZn_{13} . Ця інтерметалідна фаза досить багата на цинк. При знаходженні на поверхні забезпечує високий рівень корозійної стійкості [6].

Наступною фазою, яка розташовується під ζ -фазою, є $\delta 1$ -фаза (FeZn_7 – FeZn_{12} або $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$). Це одна з найбільш важливих фаз термодифузійних покриттів, оскільки характеризується високою твердістю, що забезпечує відмінну зносостійкість

та гарну адгезію до сталі. Містить значно більше заліза ніж ζ -фаза. Саме ця фаза багато в чому визначає захисні властивості термодифузійних покриттів. Може мати стовпчасту або стовпчасто-кристалічну структуру [5–7].

Ближче до металевої основи під час нанесення термодифузійного покриття формується $\Gamma 1$ -фаза ($\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ або FeZn_3), яка має високу твердість та містить ще більше заліза в порівнянні з δ -фазою. Зазвичай знаходиться між $\delta 1$ -фазою та Γ -фазою. Γ -фаза ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ або $\text{Fe}_{11}\text{Zn}_{40}$) – це найбагатша залізом інтерметалідна фаза, розташована безпосередньо на кордоні з металевою основою. Має максимальну твердість серед усіх фаз покриття та забезпечує дуже міцне зчеплення покриття з основою, запобігаючи відшаровуванню.

Завершує формування термодифузійного покриття α -фаза або твердий розчин цинку у залізі.

Постановка завдання. Метою статті є проведення тестування сталі обсадних труб без та з термодифузійним цинковим покриттям на стійкість до сірководневого окрихчення в імітованому середовищі сірководню.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Для досліджень були підготовлені сталеві зразки розміром $100 \times 20 \times 10$ мм із сталі марки 10. Хімічний склад сталі 10 представлений в таблиці 1. Поверхню зразків піддавали піскоструминній обробці, після чого всі зразки знежирювалися при 80°C в розчині 10% NaOH протягом 30 хвилин та ретельно промивалися проточною водою.

Для нанесення термодифузійного цинкового покриття використовували суміш, яка складалася з високочистого дрібнодисперсного порошку цинку (80%), піску (19%) та амоній хлориду (1%). Амоній хлорид в суміші виконує роль активатора термодифузійного процесу, оскільки дозволяє руйнувати оксидні плівки на поверхні як цинку, так і сталі, що полегшує вивільнення атомів цинку та процес їх дифузійного проникнення в поверхневі шари сталі.

Після закриття ємності зі зразками та цинковою сумішшю протягом години через спеціальний вхідний отвір ємності пропускали інертний газ (азот 99,96%) для витіснення кисню з внутрішнього об'єму. Заповнену реакційною сумішшю

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 10

Хімічний елемент	Концентрація, %										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti
	0,15	0,52	0,31	0,016	0,026	0,07	0,10	0,08	0,054	0,01	0,008

ємність зі зразками поміщали в муфельну піч з можливістю періодичного перевертання ємності для запобігання злипанню зразків і забезпечення рівномірного нанесення покриття на поверхню кожного зразка. Процес нанесення покриття проводили при температурі 430°C впродовж 4 годин.

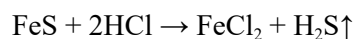
Для оцінки захисних властивостей ТДЦП на стійкість до корозійного розтріскування в присутності сірководню була зібрана установка відповідно до вимог стандарту NACE TM 0284-2016. Схема установки представлена на рис. 1.

Зразки без покриття (зразки-свідки) та зразки з ТДЦП розміщували у випробувальну ємність (ексикатор).

Відповідно до вимог стандарту NACE TM 0284-2016 для випробувань використовували розчин на основі дистильованої води, що містив 5% натрій хлориду та 0,5% оцтової кислоти. Об'єм експериментального розчину розраховували згідно з NACE TM 0284-2016, яким передбачено співвідношення не менше ніж 30 мл розчину на 1 см² поверхні зразків, що тестуються. Для видалення повітря з тестувального розчину попередньо його барботували інертним газом (азотом) впродовж однієї години. Після розташування зразків за допомогою трубок подачі газу готовий розчин заливали в герметичний ексикатор. Для видалення залишків кисню розчин зі зразками повторно барботували інертним газом впродовж години.

Початок експерименту передбачав барботаж розчину сірководнем. Для отримання сірководню в лабораторних умовах використовували апарат

Кіппа об'ємом 1 л. У верхню сферичну частину заливали рідкий реагент, який являв собою розчин 20% хлоридної кислоти. У середню сферичну або конусоподібну частину (робочу камеру) завантажували сульфід заліза FeS в кількості 200 грам. Після потрапляння розчину кислоти в камеру з сульфідом розпочиналася хімічна реакція з виділенням сірководню:



Після початку цієї хімічної реакції газовий потік сірководню спрямовували через розчин. За допомогою регулювального крана встановлювали стаціонарну швидкість потоку сірководню через розчин, що становила мінімально 8–10 бульбашок на хвилину. Такий потік газоподібного сірководню забезпечував насиченість розчину впродовж випробувань та запобігав потраплянню кисню в розчин. Забруднення розчину киснем в умовах експерименту не допускали, оскільки це сприяє різкому збільшенню швидкості корозії, що змінює механізм процесу за рахунок зменшення кількості виділеного газоподібного водню.

За вимогами NACE TM 0284-2016 термін випробувань зразків в розчині повинен становити не менше ніж 96 годин. Термін експозиції експериментальних зразків складав 96, 192 та 288 годин. Протягом періоду випробувань температуру розчину тестування підтримували в інтервалі 25±3°C.

Кожен зразок з термодифузійним покриттям до та після експозиції в розчині на основі натрій хлориду та оцтової кислоти, насиченому сірковод-

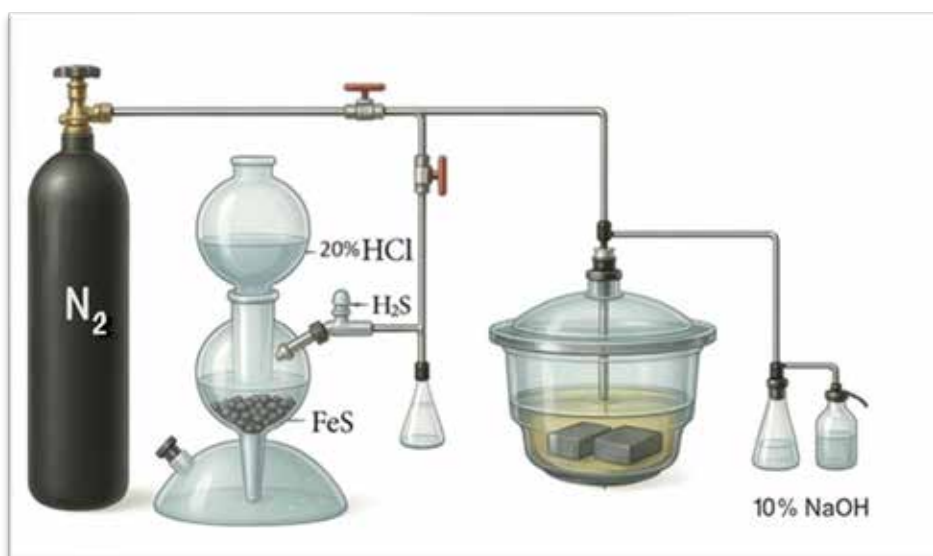


Рис. 1. Схема установки для випробувань на сірководнєве окрихнення

нем, був порізаний на фрагменти. Таким чином досліджувався поперековий зріз сталі із ТДЦП.

Після розрізання зразків на декілька частин, бокові поверхні сталевих зразків піддавали шліфуванню за традиційними методиками та проводили оцінку товщини термодифузійного шару цинкового покриття. Мікроструктуру зразків досліджували до та після травлення в 5% розчині нітратної кислоти. Фотографії поперекового зрізу зразків отримані на мікроскопі Nikon Eclipse MA100 з модуль-камерою.

Результати досліджень та їх аналіз. В перші години експерименту відмічали появу помутніння, рН розчину при цьому становив 3,8, що свідчить про утворення нерозчинних сполук цинка, які осіли після доби випробувань у вигляді осаду. рН розчину за цей час змінився і досягнув значення 4 одиниць. Зі збільшенням часу випробувань рН розчину збільшувався і після 96 годин випробувань становив 5 одиниць, що перевищувало рекомендоване стандартом NACE TM 0284-2016 значення 4.0. Зростання рН, ймовірно, пов'язано з декількома причинами. По-перше, обидві реакції катодного відновлення O_2 та H_2O призводять до утворення іонів OH^- . По-друге, підвищенню рН розчину сприятиме також гідроліз продуктів корозії із сірководнем, а саме ZnS та Zn^{2+} з подальшим утворенням гідроксиду цинку.

Вивчення поверхонь досліджених зразків показало, що тільки у одного зразка-свідка з п'яти паралельних, який не мав захисного покриття, виявлено тріщину водневого розтріскування (фото зразка з тріщиною показано на рис. 2).

Аналіз фото поверхні зразка показав, що внаслідок прискорених випробувань на сталі утвори-

лася одна велика тріщина довжиною 1006,5 мкм та декілька тріщин меншого розміру від 45,1 до 133,8 мкм. Ці тріщини утворилися внаслідок створення внутрішніх напружень за рахунок насичення металу воднем, що виділяється під час процесу корозії з водневою деполяризацією. Наявний в розчині сірководень є додатковим деполяризатором, що сприяє прискоренню виділення водню.

Аналіз зразків, на поверхню яких було нанесено цинкове термодифузійне покриття, показав, що на жодному з них тріщини були відсутні.

Мікроструктура дослідженого зразка з термодифузійним покриттям до випробувань представлена на рис. 3.

Аналіз фото свідчить, що найбільша загальна товщина покриття досягає 156 мкм. Цинкове покриття складається з трьох шарів. Зовнішній шар покриття відповідає ймовірно ζ -фазі, яка максимально збагачена цинком. Всередині покриття сформований більш тонкий за товщиною шар з іншою більш щільною структурою, що чітко видно на фото. Вірогідно це δ -фаза, яка відіграє важливу роль у покритті як фаза з підвищеною твердістю. З отриманого фото неможливо виділити окремо δ 1-фазу. Останній шар, що найбільш наближений до поверхні сталі, є Γ -фазою з товщиною не менше 40 мкм.

Дослідження стану цинкового термодифузійного покриття, нанесеного на сталеві зразки Ст10 після випробувань у розчині NACE TM 0284-2016, насиченому сірководнем, показало наступні результати. Як видно з наведених фото зразків після випробувань протягом 96, 192 та 288 годин (рис. 3, а-г), зі збільшенням часу знаходження зразків у випробувальному середовищі спостерігається зменшення загальної товщини покриття з 156 мкм до 37 мкм. Це свідчить про те, що верхні шари цинкового покриття, що містили ζ - та δ -фазу, майже повністю розчинилися в досліджуваному сірководневому водному середовищі.

Отримані результати, свідчать, що в умовах середовища, насиченому сірководнем, термодифузійні покриття мають недостатню стійкість за рахунок високої швидкості розчинення поверхневої ζ -фазу, насиченої цинком. В таких умовах атоми цинку досить швидко розчиняються. Зовнішній вигляд зразків свідчить про виразковий характер корозії. Тому для підвищення стійкості цинкового термодифузійного покриття в умовах високонасичених сірководнем середовищах необхідна розробка нових більш складних комбінованих покриттів.

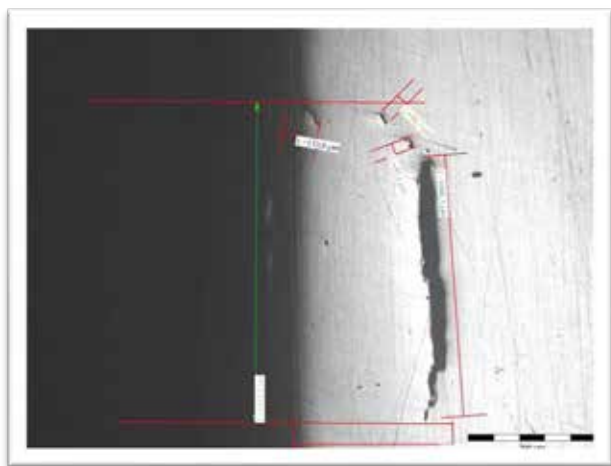


Рис. 2. Фото поверхні зразка Ст10 з тріщиною водневого розтріскування після випробувань у розчині NACE, насиченому сірководнем (x500)

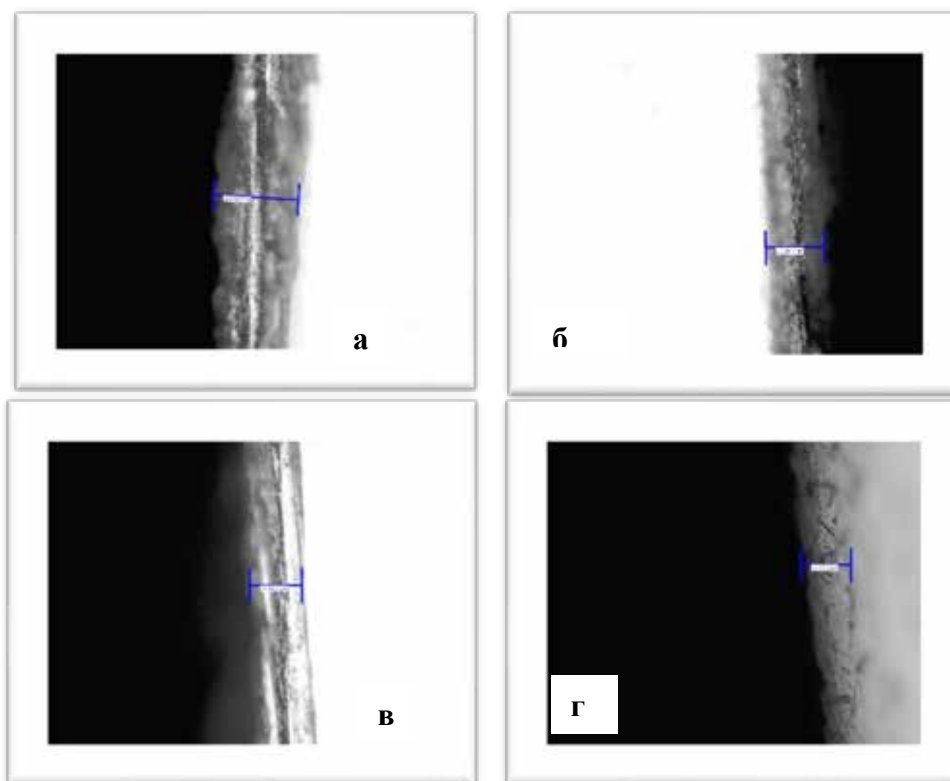


Рис. 3. Товщина ТДЦП на сталі 10 до випробувань (а) та після 96 (б), 192 (в) і 288 (г) годин експозиції в середовищі NACE, насиченому сірководнем (x500)

Висновки. На підставі отриманих даних можна стверджувати, що термодифузійні цинкові покриття, отримані в порошкових сумішах, зменшують ризик появи тріщин водневого окрихчення на низьковуглецевих сталях. В умовах випробувань у середовищі NACE TM 0284-2016, насиченому сірководнем, термодифузійні цинкові покриття, нанесені на сталь 10, піддавалися досить швидкому розчиненню. Металографічний аналіз залишків цинкового шару після проведення

випробувань показав, що з часом експозиції в розчині істотно зменшується товщина поверхневого шару ζ -фази. Після випробувань протягом 96, 192 та 288 годин загальна товщина шару термодифузійного покриття знизилась зі 156 мкм до 37 мкм після 288 годин експозиції.

Для підвищення стійкості термодифузійного цинкового покриття в умовах середовищ, насичених сірководнем, рекомендовано використання комбінованих цинкових покриттів.

Список літератури:

1. Zhao W., Zhang T., Wang Y., Qiao J., Wang Z. Corrosion failure mechanism of associated gas transmission pipeline. *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 10. Art. 1935. DOI: 10.3390/ma11101935.
2. Pinchuk S., Galchenko G., Simonov A., Masakovskaya L., Roslyk I. Complex corrosion protection of tubing in gas wells. *Chem. Chem. Technol.* 2018. Vol. 12, No. 4. P. 529–532. DOI: 10.23939/chcht12.04.529.
3. Madan A. Al., Hussein A., Akhtar S. S. A review on internal corrosion of pipelines in the oil and gas industry due to hydrogen sulfide and the role of coatings as a solution. *Corros Rev.* 2025. Vol. 43, No. 2. P. 189–208. DOI: 10.1515/correv-2024-0114.
4. Pistofidis N., Vourlias G., Chaliampalias D., Chrysafis K., Stergioudis G., Polychroniadis E.K. On the mechanism of formation of zinc pack coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Vol. 407, No. 1-2. P. 221–225. DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.06.039.
5. Kania H., Sipa J. Microstructure Characterization and Corrosion Resistance of Zinc Coating Obtained on High-Strength Grade 10.9 Bolts Using a New Thermal Diffusion Process. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 9. Art. 1400. DOI: 10.3390/ma12091400.
6. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings. In: *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance* / Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers. 2015. P. 737–750. DOI: 10.1533/9780857096524.5.737.

7. Gao H., Li X., Feng W., Peng D. Numerical Modeling of Zinc Diffusion During Sherardizing Process. *J. Phase Equilib. Diffus.* 2018. Vol. 39, No. 2. P. 237–245. DOI: 10.1007/s11669-018-0626-3.

Chyhyrynets O.E., Mamrenko O.S. CORROSION OF THERMODIFFUSION ZINC COATING IN A SIMULATED HYDROGEN SULFIDE ENVIRONMENT

The article considers the stability of zinc coating on unalloyed St10, obtained by thermochemical diffusion method, in NACE TM 0284-2016 solution saturated with hydrogen sulfide, which simulates corrosion processes of equipment in the oil and gas industry. It is noted that the oil and gas industry is a metal-intensive industry, which is associated with a high turnover of metal stock, and therefore requires certain solutions for its protection against corrosion. Traditionally, the main type of corrosion destruction in the oil and gas industry is carbon dioxide corrosion, which occurs under the influence, mainly, of carbon dioxide. However, the number of wells contaminated with microorganisms is increasing every year, which adds to the aggressive components of the environment also extremely aggressive hydrogen sulfide. Therefore, to reduce the costs of well maintenance, effective methods of protecting equipment from corrosion in the conditions of this production are needed.

A wide range of corrosion protection methods involves both the transition of the industry to alloyed steels and other methods related to the application of coatings to the surface of pipes used in the oil and gas industry. However, the alloyed range of steels has a higher cost, which significantly increases the costs of oil and gas production. Therefore, the most widely used method of corrosion protection is coating.

It is shown that among the large number of known methods of protecting industry equipment, zinc coatings are one of the most effective and less expensive methods, which helps reduce the cost of replacing metal equipment damaged by corrosion. Among the galvanizing methods, one of the most promising are coatings obtained by the chemical-thermal method in powder mixtures or by the thermal diffusion method, since, unlike others, they have the best adhesion to the metal surface under conditions of high fluid flow rates. The structure and chemical composition of the phases that make up the structure of the coating obtained by the thermal diffusion method have been analyzed.

The work assessed the resistance of metal samples of Steel 10 with zinc thermal diffusion coating to hydrogen sulfide embrittlement. A setup was assembled for testing that allows modeling corrosion processes in the conditions of the oil and gas industry with hydrogen sulfide contamination. It was found that in the NACE TM 0284-2016 solution saturated with hydrogen sulfide, one of the five tested samples of Steel 10 without coating had a crack after testing, which indicates a high probability of unalloyed steels destruction of in the conditions of oil and gas production from wells with hydrogen sulfide. However, samples with zinc coating applied by the thermal diffusion method under these conditions after 288 hours of testing did not have signs of cracks, which indicates an increased resistance of the zinc coating to hydrogen sulfide embrittlement. Studies of metallographic sections of samples showed that the zinc coating during the accelerated tests in hydrogen sulfide environments is prone to chemical dissolution with a decrease in the thickness of the coating. The obtained data indicates the need to find ways to increase the stability of the zinc layer by obtaining combined coatings.

Key words: corrosion, testing, model environment, zinc thermal diffusion coating, hydrogen sulfide embrittlement.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 02.09.2025

Опубліковано: 27.10.2025

УДК 637.5.02

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/33>**Шульга І.В.**ДП «Український державний науково-дослідний
вуглехімічний інститут (УХІН)»**Мещанін В.І.**ДП «Український державний науково-дослідний
вуглехімічний інститут (УХІН)»**Котляров Є.І.**Науково-дослідний центр індустріальних проблем
розвитку Національної академії наук України**Карсв А.І.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Лебедєв В.В.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ТЕРМОХІМІЧНА ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ

У статті розкрито необхідність термохімічної переробки відходів поліетилентерефталату, оскільки відходи споживання цього одного з найбільш великотоннажних полімерів, потрапляючи у довкілля, стають ксенобіотиками, тобто практично не розкладаються під впливом природних факторів. Доведено, що утилізація відходів цього полімеру в складі вугільної шихти для коксування не є ефективною, оскільки додавання цих відходів до шихти призводить до суттєвого погіршення якості коксу, що протирічить головним принципам утилізації відходів в коксохімічному виробництві. Була запропонована двостадійна технологія термохімічної переробки: піроліз відходів шляхом їх нагріву без доступу повітря до кінцевої температури 500 °C; парокиснева газифікація отриманого на першій стадії твердого залишку; очищення газів, одержаних на обох попередніх стадіях. Досліджено, що отриманий сумарний газ є цілком придатним для енергетичного використання з огляду на його високу теплоту спалювання Q_v , при цьому для забезпечення власних енергетичних потреб процесу достатньо 112 м³ газу на 1 т сировини, а решта (1242 м³/т) може бути використана для виробництва товарної пари та електроенергії. Встановлено, що при використанні одержаного газу, наприклад, для синтезу вуглеводнів за Фішером-Тропшем, в отримувані цільові продукти конвертується лише 43,55 % об'єму сумарного газу, а залишок після вилучення вуглеводнів становитиме 764 м³/т, в тому числі 287 м³ CO₂ та 477 м³/т CO. Показано, що при цьому для забезпечення власних енергетичних потреб піролізу достатньо лише 388 м³/т CO, решта непродуктивно допалюватиметься перед скиданням в атмосферу, утворюючи парниковий вуглекислий газ, загальна кількість якого сягатиме (разом з CO₂, утвореним за піролізу та газифікації) 512 м³/т, або 1005 кг/т (більша маса утвореного CO₂ в порівнянні з масою сировини спричинена використанням за спалювання кисню повітря). В рамках проведених досліджень доведена необхідність розробки способу піролізу, що дозволить збагачувати отриманий газ воднем.

Ключові слова: поліетилентерефталат, відходи споживання, піроліз, газифікація, синтез-газ.

Постановка проблеми. Поліетилентерефталат (ПЕТФ) є одним з найбільш великотоннажних полімерних продуктів, що широко використовуються для виробництва різноманітної тари, зокрема, пляшок для охолоджувальних напоїв [1]. Це – полімер *n*-етилентглікольтерефталевої кислоти зі структурною формулою: $[-OOC-C_6H_4-COO-CH_2-]_n$. Брутто-формула $(C_{10}H_8O_4)_n$ відповідає елементному складу (мас. %): вуглець – 62,5; водень – 4,2; кисень – 33,3. Утворювані у великій кількості відходи ПЕТФ не розкладаються під дією природних факторів [2]. За спалювання відходів ПЕТФ відбувається деструкція макромолекул на уламки меншої молекулярної маси, при цьому утворюється велика кількість різноманітних сполук, в тому числі вельми отруйних. Це зумовлює актуальність нашого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У порівнянні зі спалюванням відходів піроліз має низку екологічних та енергозберігаючих переваг [3]. Найбільш масштабною за обсягами переробки промисловою технологією піролізу в нашій країні та в світі є високотемпературне коксування вугілля (нагрів його без доступу повітря до кінцевої температури 1000–1100 °C) [4]. Загальні теоретичні основи використання органічних добавок у виробництві коксу розроблені під керівництвом українського вченого Ю.Б. Тютюнникова [5]. Висловлене припущення про вплив розплавів пластмас на колоїдну структуру вугілля, що викликає пептизацію [6] – руйнування вихідної структури з утворенням дрібніших фрагментів, що збільшує реакційну поверхню, необхідну для здійснення гетерогенних процесів спікання. Зміна при цьому групового хімічного складу органічної речовини вугілля впливає на показники реакційної здатності та міцності коксу [7]. Однак за надмірної кількості (більше 1–2 %) відходів, що додаються до вугільних шихт, порушується відповідність між кількістю утворюваних рідкорухливих продуктів та величиною змочуваної ними реакційної поверхні. Тому додавання полімерних відходів до складу вугільних шихт для коксування

не вирішує повною мірою проблеми утилізації цих відходів.

Згідно з результатами огляду джерел науково-технічної інформації нами запропонована технологія термохімічної переробки відходів ПЕТФ, за якої підготовлені відходи піролізують шляхом нагріву без доступу повітря до кінцевої температури 500 °C. Отримуваний при цьому твердий залишок піддають парокисневій газифікації. Згідно розрахунку [8] аналізу продуктів термохімічної переробки відходів ПЕТФ при реалізації двостадійної технології стає можливим розрахунок ефективного складу продуктів (табл. 1).

Через це запропонована двохстадійна технологія термохімічної переробки: піроліз відходів шляхом їх нагріву без доступу повітря до кінцевої температури 500 °C; парокиснева газифікація отриманого на першій стадії твердого залишку; очищення газів, одержаних на обох попередніх стадіях.

Постановка завдання. Першу стадію переробки відходів виконували в лабораторній електричній печі конструкції ДП «УХІН» [9]. Для парокисневої газифікації отриманого твердого залишку піролізу використовували створену в ДП «УХІН» лабораторну установку газифікації [10], схема основного вузла якої показана на рис. 1. Використання газогенератору барабанного типу дає можливість досліджувати в лабораторних умовах паливо різного виду та крупності, розширити межі температурного інтервалу газифікації. В барабан 1 із завантажувального пристрою 4 із щільним дозатором надходить вихідний матеріал, що утворює засипку 2. Решітка-насадка, розташована всередині барабану, забезпечує необхідний контакт засипки з реагентами, що подаються крізь підвідні штуцери. Утворюваний генераторний газ відводиться з протилежного торця барабану. З цього ж боку в твердому вигляді до приймача 8 відводиться зола, утворювана внаслідок газифікації.

Конструкція голівки 3 та іншої арматури, встановленої на протилежних торцях барабану, забезпечує повну взаємозамінність вузлів і дозволяє

Таблиця 1

Розрахунок ефективного складу продуктів термохімічної переробки відходів ПЕТФ

Продукти	Вміст, % мас.	
	Піроліз відходів шляхом їх нагріву без доступу повітря до кінцевої температури 500 °C	Піроліз та парокиснева газифікація отриманого на першій стадії твердого залишку
Газоподібні продукти	18,1-18,9	25,4-26,1
Рідкі продукти	64,2-65,8	63,0-64,2
Сухий залишок	16,1-16,9	10,2-10,9

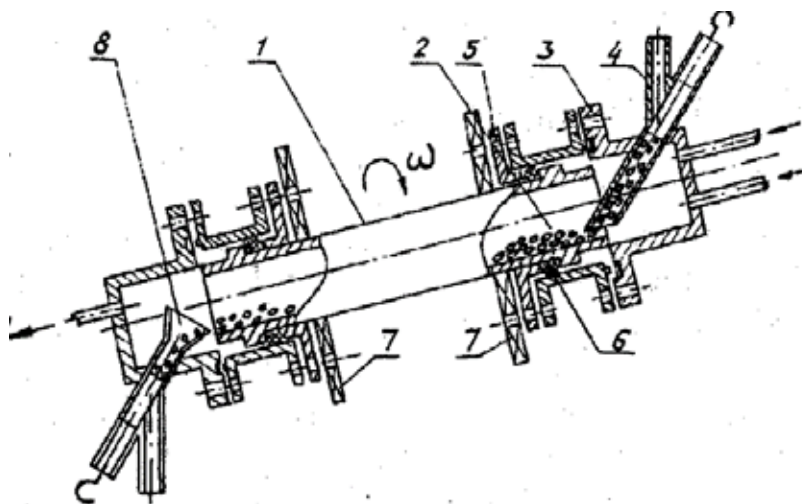


Рис. 1. Газогенератор барабанного типу

дослідити різні варіанти організації руху матеріальних потоків (прямоток, протиток, комбінований). Газощільність печі, що обертається, забезпечується за допомогою притискної втулки 5 та сальника 6. Обертання печі здійснюється від електричного приводу (на схемі не показаний), центрування печі – за допомогою опорних роликів 7.

Схема лабораторної установки газифікації в цілому наведена на рис. 2. Резервуар 7, крапельниця 8, парогенератор 9 забезпечують тонке регулювання подачі пари, а компресор 11 – подачу повітря. Вивід установки на пусковий режим забезпечувався шляхом спалювання суміші природного газу з повітрям. Для запалювання суміші використовують пристрій 12. Необхідна для проведення реакцій газифікації температура підтримується за допомогою печі 2 та контрольно-вимірювальних приладів 16. Вивантаження твердого залишку відбувається до бункера 6, а продукти газифікації, охолоджені у водяному холодильнику 14, враховуються газовим лічильником 15 та аналізуються. Конструктивне виконання установки дозволяє змінювати кут нахилу печі в межах 1–5°; ланцюгова передача та виконавчий механізм забезпечують швидкість обертання 1–5 хв⁻¹.

Температуру в реакційній зоні, час перебування в ній матеріалу та масу завантаженого вуглецевого матеріалу витримували сталими та рівними відповідно 900 °С; 1,5 години та 100 г. В цьому випадку показники процесу під тиском, близьким до атмосферного, в кінцевому підсумку визначаються двома параметрами – витратою пари та повітря на дуття. Необхідна витрата повітря легко досягається за допомогою регуляторів витрати та її контролю (наприклад, пінним витратоміром або денсиметром).

В той же час вимір малих витрат пари за умов лабораторних досліджень є складнішою задачею, оскільки залежить від температури у випарнику та протитиску в газогенераторі.

Нами був обраний принцип непрямого виміру витрати пари: за витратою води, що надходить до випарнику з крапельниці, яка забезпечує тонке регулювання витрати в межах 0,3–2100 см³/годину.

Слід зазначити, що процес формування геометричного об'єму краплі за умов експерименту стабільний, оскільки залежить лише від коефіцієнту поверхневого натягу, який, в свою чергу, визначається лише температурою, значення якої практично не змінюються за умов експерименту. Частота падіння крапель зумовлена гідростатичним напором, створюваним за допомогою резервуару, та прохідним перерізом голчастого крану для регулювання подачі води до крапельниці.

Схема передбачає тонке крапельне дозування подачі води з наступним її випаровуванням, що дозволяє протягом всього дослідження здійснювати дозування пари на газифікацію. На підставі цього принципу була розроблена електронна схема та створений лічильник крапель, що працює як суматор та масовий витратомір.

У вікнах крапельниці встановлені фотоприймач та джерело світла. Крапля, що формується на кінці косої різки капілятору крапельниці, викликає зміну освітленості фотоприймача, а це призводить до розбалансування мосту опорів та появи сигналу на вході до підсилювача, чутливість якого визначається електричним опором зворотного зв'язку. Регулювання мосту на вході до підсилювачу здійснюється реостатом, встановлення фону освітленості – потенціометром R8.

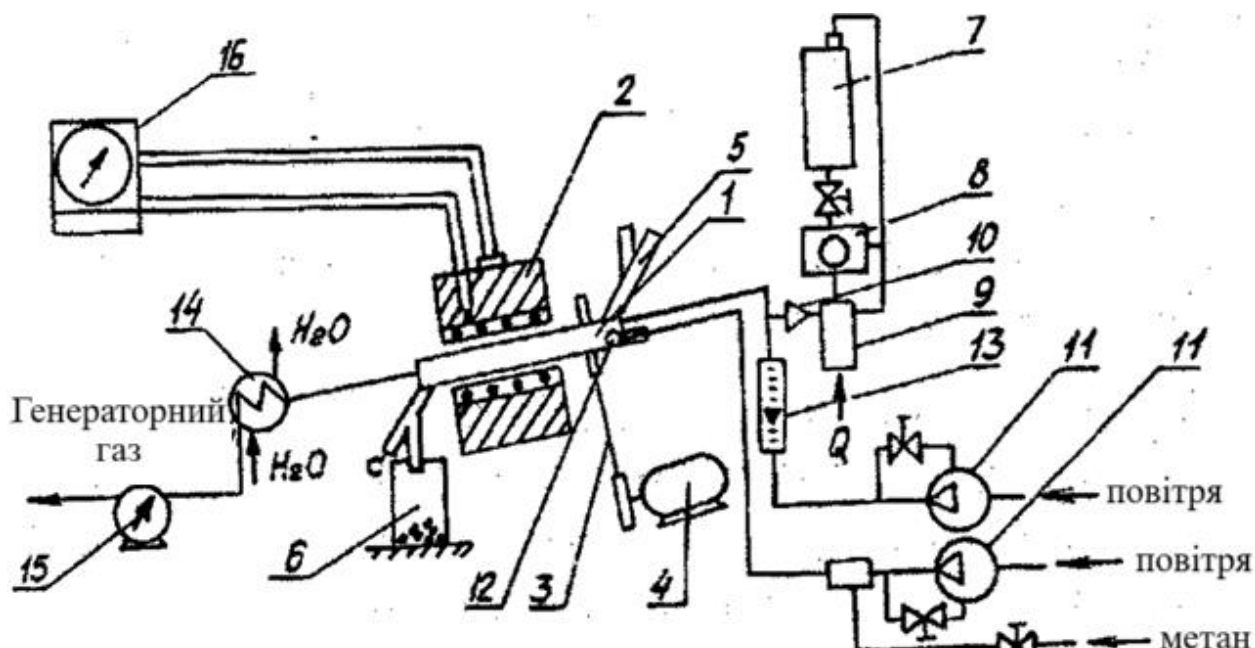


Рис. 2. Схема лабораторної установки: 1 – барабан; 2 – піч; 3 – ланцюгова передача; 4 – електродвигун; 5 – завантажувальний пристрій; 6 – бункер; 7 – резервуар; 8 – крапельниця; 9 – парогенератор; 10 – зворотний клапан; 11 – компресор; 12 – запальний пристрій; 13 – ротаметр; 14 – водяний холодильник; 15 – газовий лічильник; 16 – щит контрольно-вимірювальних приладів

Наявність сигналу на вході до підсилювачу викликає появу сигналу на його виході, транзистор відкривається, забезпечуючи світіння світло діоду, який зібраний в одному копусі із фотоприймачем. Разом світло діод та фотоприймач є аналогом оптрону, що забезпечує гальванічну розв'язку схеми живлення та інтегральної мікросхеми. Зміна фотоструму від темного значення до робочого комутує виводи інтегральної мікросхеми в режимі суматору.

Основні технологічні параметри стадій піролізу та газифікації, використані нами за дослідження термохімічної переробки відходів, наведені в табл. 2. Кількість отриманого газу враховувалась газовим лічильником. Через кожні 10 дм³ відбирали разові проби отриманого газу об'ємом 1 дм³ кожна, які накопичували та усереднювали в газометрі. Аналіз об'єднаної проби газу виконували волюметричним та хроматографічним методами згідно з технічними умовами на коксовий газ [11]. За результатами аналізу розра-

ховували показник нижчої теплоти спалювання газу Q_i за методикою [12].

Виклад основного матеріалу. Склади та кількості газу, отриманого на стадіях піролізу та газифікації, а також склад та кількість сумарного газу наведені в табл. 3.

Як видно з даних табл. 2, за піролізу відходів виконуються загальні закономірності, встановлені для низькотемпературних процесів деструкції палив без доступу повітря [13], а саме:

– ≈ 50 % елементного кисню сировини разом з часткою елементного водню витрачається на утворення пірогенетичної води:



– ≈ 10 % елементного кисню сировини витрачається на утворення вуглекислого газу:



– ≈ 30 % елементного водню витрачається на утворення метану:

Таблиця 2

Технологічні параметри процесу термохімічної переробки полімерних відходів

Параметри	Одиниці виміру	Числові значення
Кінцева температура піролізу	°C	500
Витрата компонентів дуття на газифікацію твердого залишку піролізу:		
кисень	м ³ /т (20 °C, 101,3 кПа)	819
водяна пара	кг/т	550

Таблиця 3

Характеристика отримуваних газів

Стадія	Вихід газу, м ³ /т ПЕТФ	Склад сухого газу, об. %					Q _p , МДж/м ³
		CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	H ₂	CO	
Піроліз	340	7,3	41,3	1,3	22,8	27,3	21,6
Газифікація	1014	25,8	-	-	21,6	52,6	9,0
Разом	1354	21,2	10,4	0,3	21,9	46,2	12,1



– ≈ 4 % елементного водню витрачається на утворення важких вуглеводнів, наприклад:



– залишок водню (≈ 66 %) переходить в газ в молекулярному вигляді:

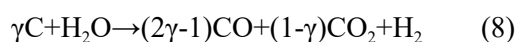
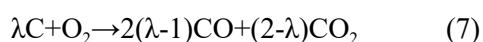


– залишок елементного кисню (≈ 40 %) утворює оксид вуглецю CO:



– решта вуглецю у вигляді твердого залишку піролізу надходить на парокисневу газифікацію.

Узагальнене рівняння стадії газифікації має вигляд [14]:



Тут λ та γ – числові коефіцієнти, що характеризують співвідношення кількостей CO та CO₂ в продуктах реакції. Їх значення знаходяться наступних межах:

$$1 \leq \lambda \leq 2 \quad (9)$$

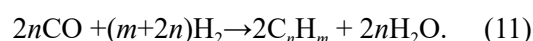
$$0,5 \leq \gamma \leq 1 \quad (10)$$

Величини λ та γ залежать від умов здійснення процесу і в першу чергу визначаються його тепловим балансом: частина вуглецю спалюється в екзотермічній реакції з отриманням вуглекислого газу, а виділене тепло витрачається на здійснення ендотермічної реакції решти вуглецю та водяної пари з виділенням водню та монооксиду вуглецю.

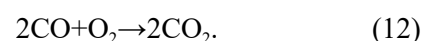
Як видно з даних табл. 2, отримуваний газ є цілком придатним для енергетичного використання з огляду на його високу теплоту спалювання Q_p . При цьому, як свідчать розрахунки теплового балансу стадії піролізу, виконані згідно із загальною методикою складання теплового балансу процесів термохімічної переробки [15], для забезпечення власних енергетичних потреб процесу достатньо 112 м³ газу на 1 т сировини, а решта

(1242 м³/т) може бути використання для виробництва товарної пари та електроенергії. Кількість останньої сягає 1700 кВт·годин/т ПЕТФ.

Для оцінки можливості хіміко-технологічного використання отриманого газу розглядали можливість його використання для синтезу вуглеводнів за Фішером-Тропшем згідно із сумарним рівнянням [16]:



Як видно з цього рівняння, стехіометрична кількість водню повинна практично вдвічі перевищувати кількість монооксиду вуглецю CO. В отриманому газі співвідношення H₂:CO майже зворотнє (0,47), що є суттєвим загальним недоліком всіх генераторних газів. З урахуванням цього за використання одержаного газу для синтезу вуглеводнів за Фішером-Тропшем в отримуваних цільові продукти (з урахуванням вже наявних у сумарному газі метану та важких вуглеводнів в перерахунку на етилен) конвертується лише 43,55 % об'єму сумарного газу. Залишок після вилучення вуглеводнів становитиме 764 м³/т, в т.ч. 287 м³ CO₂ та 477 м³ CO. При цьому для забезпечення власних енергетичних потреб піролізу достатньо лише 388 м³/т CO. Решта непродуктивно допалюватиметься перед скиданням в атмосферу:



При цьому утворюватиметься додаткова кількість парникового вуглекислого газу, що не обґрунтована безпосередніми технологічними потребами процесу, а це протирічить вимогам щодо досягнення вуглецевої нейтральності економіки [17]. Загальна кількість такого газу сягатиме (разом з CO₂, утвореним за піролізу та газифікації) 512 м³/т або 1005 кг/т (більша маса утвореного CO₂ в порівнянні з масою сировини спричинена використанням за спалювання кисню повітря). Кількість необґрунтованого парникового газу буде ще більшою за використання отриманого газу для інших синтезів, наприклад, метанолу за реакцією:



Відомий спосіб збагачення генераторного газу перед синтезом Фішера-Тропша додатковою кількістю водню, отриманого шляхом електролізу води [18]. Однак у випадку утилізації полімерних відходів це не є економічним, оскільки використовується парокиснева газифікація твердого залишку піролізу в стаціонарному шарі, на відміну від згаданого способу [18], де для газифікації вугілля використовується високоенергетична технологія газифікації Техасо, яка дає можливість отримувати як супутній продукт електроенергію в кількості, достатній для забезпечення електролітичного отримання водню. Отже, необхідна розробка способу піролізу, що дозволяє збагачувати отриманий газу воднем.

Висновки. Запропонована технологія піролізу відходів ПЕТФ, що складається за стадій

піролізу ПЕТФ (нагріву без доступу повітря до 500 °C), парокисневої газифікації отриманого залишку піролізу, очищення отриманих газів та їх змішування з одержанням сумарного газу. За енергетичного використання отриманого сумарного газу ресурси, що залишаються після забезпечення власних енергетичних потреб піролізу, дозволяють генерувати 1700 кВт·годин на 1 т ПЕТФ. За хімічного використання газу кількість водню в ньому недостатня для конверсії всього вуглецю в цільові продукти, що призводить до утворення надлишків оксиду вуглецю та в кінцевому підсумку – викидам парникового вуглекислого газу. Тому необхідна розробка способу піролізу, що дозволяє збагачувати отриманий газ воднем.

Список літератури:

1. Янушевська О.І., Кринець Г.В., Літинська М.І. Інтегровані хімічні технології переробки вторинних матеріалів. Ч. 1. Київ: КПІ, 2022. 99 с.
2. Єфремова О., Іванішена Т., Іщук Т., Трухіна О., Єфремова Ю. Сучасне становище поводження з полімерними відходами. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022 (313). С. 26-31.
3. Vinnichenko V., Shulga I., Saffiotti P. Ecological feasibility of pyrolysis in comparison with the incineration of municipal solid waste. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2490. Issue 1, 050006.
4. Шульга І.В., Мірошніченко Д.В., Богоявленська О.В. Основи технології коксування вугілля: навч. посіб. Харків – Тернопіль: Крок, 2022. 128 с.
5. Тютюнников Ю.Б., Сінцєрова Л.Г., Гречко Ю.І., Лялюк В.С. Органічні добавки у виробництві коксу. Київ: Техніка, 1971. 96 с.
6. Kojić I., Bechtel A., Aleksić N., Životić D., Trifunović S., Gajica G., Stojanović K. Study of the synergetic effect of co-pyrolysis of lignite and high-density polyethylene aiming to improve utilization of low-rank coal. *Polymers*. 2021. Vol. 13. С. 759.
7. Shmeltser K., Kormer M., Liakhova I. Influence chemical composition of the coal mineral substance on the thermochemical properties blast furnace coke. *Economics and technical engineering*. 2023. Vol.1(2). P. 128-142.
8. Sá M.S., Martins T., Melo J.A., De Carvalho Carregosa J., Wisniewski A. Assessment of co-pyrolysis of polyethylene terephthalate with waste cooking oil: Kinetic study and impact on the chemical constituents of the liquid product. *Waste Management*. 2024. Vol. 193. P. 237-249.
9. Miroshnichenko D., Shmeltser K., Kormer M., Sytnyk O., Avdeyuk I., Miroshnichenko M., Shved M. Using coal resources with optimal bursting pressure for the production of high-quality metallurgical coke. *Resources*. 2025. № 14. P. 70.
10. ТУ У 35.2-00190443-101:2014. Газ коксовий очищений. Технічні умови. – Харків: ДП «УХІН», 2014. 35 с.
11. Шульга І.В., Мірошніченко Д.В., Балаєва Я.С. Методика розрахункового визначення середньозважених показників нижчої теплотворної здатності коксохімічної продукції. Харків: ДП «УХІН», 2011. 17 с.
12. Palone O., Gagliardi G. G., Mechelli M., Cedola L., Borello D. Techno-economic analysis of sustainable methanol and ammonia production by chemical looping hydrogen generation from waste plastic. *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 292. P. 117389.
13. Shulga I., Kyzym M., Kotliarov Y., Khaustova V. Improvement of the ecological efficiency of synthetic motor fuel production in Ukraine. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. 2024. Vol. 11(2). P. H11–H25.
14. Шульга І.В., Мірошніченко Д.В. Устаткування підприємств з переробки твердих горючих копалин: навч. посіб. Харків – Тернопіль: Крок, 2022. 209 с.
15. Шульга І.В., Д.В. Мірошніченко. Розрахунок і проектування устаткування вуглепідготовчих і коксових цехів коксохімічних. Харків: НТУ ХПІ, 2020. 320 с.
16. Хаустова В.С., Кизим М.О., Котляров Є.І., Шульга І.В., Губарева І.О., Шпілевський В.В., Салашенко Т.І., Костенко Д.М., Хаустов М.М., Хаустова В.Є. Обґрунтування створення виробництва синтетичного моторного палива з вугілля в Україні. Харків: ФОП Лібуркіна Л.М., 2024. 514 с.

17. Shulga I., Kyzym M., Kotlarov Y., Khaustova V. Improvement of the ecological efficiency of synthetic motor fuel production in Ukraine. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. V. 11 (2). P. H11-H25.
18. Патент України № 156530. Шульга І.В., Кизим М.О., Хаустова В.Є., Котляров Є.І. Спосіб отримання синтетичних моторних палив з вугілля. 2024. № 9.

Shulga I.V., Meshchanin V.I., Kotlarov E.I., Kariev A.I., Lebedev V.V. THERMOCHEMICAL PROCESSING OF POLYETHYLENETEREPHTHALATE WASTE

The article reveals the need for thermochemical processing of polyethylene terephthalate waste, since the waste from the consumption of this one of the most large-tonnage polymers, when released into the environment, becomes xenobiotic, that is, practically does not decompose under the influence of natural factors. It is proven that the utilization of waste of this polymer as part of the coal charge for coking is not effective, since the addition of these wastes to the charge leads to a significant deterioration in the quality of coke, which contradicts the main principles of waste utilization in coke chemical production. A two-stage technology of thermochemical processing was proposed: pyrolysis of waste by heating it without air access to a final temperature of 500 °C; steam-oxygen gasification of the solid residue obtained at the first stage; purification of gases obtained at both previous stages. It was investigated that the obtained total gas is quite suitable for energy use due to its high calorific value Q_i , while 112 m³ of gas per 1 ton of raw material is sufficient to meet the process's own energy needs, and the rest (1242 m³/t) can be used to produce commercial steam and electricity. It was found that when using the obtained gas, for example, for the synthesis of hydrocarbons by Fischer-Tropsch, only 43.55% of the total gas volume is converted into the target products obtained, and the residue after the extraction of hydrocarbons will be 764 m³/t, including 287 m³ of CO₂ and 477 m³/t of CO. It is shown that in this case, only 388 m³/t of CO is sufficient to meet the pyrolysis's own energy needs, the rest will be unproductively burned before being released into the atmosphere, forming greenhouse carbon dioxide, the total amount of which will reach (together with CO₂ formed during pyrolysis and gasification) 512 m³/t, or 1005 kg/t (the greater mass of CO₂ formed compared to the mass of raw materials is caused by the use of oxygen during combustion). The conducted research has proven the need to develop a pyrolysis method that will allow enriching the resulting gas with hydrogen.

Key words: polyethyleneterephthalate, consumer waste, pyrolysis, gasification, synthesis gas.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 28.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Яременко В.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Чорний О.О.

Акціонерне товариство «Фармак»

Федоренко В.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Гой А.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

Гурєва С.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

Лісовий В.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

ПОКРАЩЕННЯ РОЗЧИНЕННЯ МАЛОРОЗЧИННИХ АКТИВНИХ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРОТИЗАПАЛЬНОЇ ДІЇ МЕТОДОМ СПІЛЬНОГО ПОДРІБНЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ НОСІЯМИ

Проблема низької розчинності у водному середовищі є ключовим бар'єром для терапевтичної ефективності багатьох активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ), зокрема нестероїдних протизапальних засобів (НПЗЗ). Метою даної роботи було покращення розчинення мефенамінової кислоти шляхом створення аморфних твердих дисперсних систем (ТДС) методом спільного подрібнення з різними полімерними носіями. Було виготовлено дев'ять композицій на основі мефенамінової кислоти з гідроксипропілметилцелюлозою (HPMC), гідроксипропілцелюлозою (HPC) та полівінілпіролідом (PVP), а також з додаванням допоміжних речовин. Отримані ТДС досліджували за допомогою спектрофотометрії, диференціальної скануючої калориметрії (DSC), ІЧ-спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR) та оптичної мікроскопії. Всі отримані композиції продемонстрували значне підвищення розчинності порівняно з чистою субстанцією. Найвищий показник – збільшення розчинності в 71,24 рази – було зафіксовано для трикомпонентної системи «мефенамінова кислота : HPMC : цетилпіридинію хлорид». Аналіз DSC підтвердив повний перехід кристалічної мефенамінової кислоти в аморфний стан у всіх ТДС, що виражалось у зникненні її ендотермічного піка плавлення. Дані FTIR-спектроскопії засвідчили руйнування кристалічної ґратки АФІ та утворення нових водневих зв'язків між мефенаміновою кислотою та полімерами-носіями. Мікроскопія показала, що PVP формує гомогенні, склоподібні тверді розчини, тоді як похідні целюлози утворюють гетерогенні системи, де аморфна діюча речовина інкапсульована в полімерній матриці. Таким чином, метод спільного подрібнення є ефективною, економічною та екологічною технологією для підвищення розчинності мефенамінової кислоти. Встановлено, що гетерогенні системи інкапсульованого типу на основі похідних целюлози забезпечують вищий ступінь солюбілізації порівняно з гомогенними твердими розчинами на основі PVP.

Ключові слова: мефенамінова кислота, спільне подрібнення, аморфні тверді дисперсії, підвищення розчинності, диференціальна скануюча калориметрія, FTIR-спектроскопія.

Постановка проблеми. Проблема низької розчинності у водному середовищі залишається однією з найгостріших у сучасній фармацевтичній розробці, оскільки вона безпосередньо обмежує терапевтичну ефективність багатьох лікарських препаратів. Близько 70% нових кандидатів у лікарські засоби мають недостатню розчинність, що є головною причиною їх низької та варіабельної біодоступності [1, 2]. Нестероїдні протизапальні засоби (НПЗЗ), багато з яких належать до II класу Біофармацевтичної класифікаційної системи (BCS) (низька розчинність, висока проникність), є яскравим прикладом цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для подолання проблеми низької розчинності розроблено низку стратегій, таких як хімічна модифікація (утворення солей, співкристалів), використання комплексоутворювачів (циклодекстринів) та фізична модифікація, що включає зменшення розміру частинок (мікронізація, нанонізація) та аморфізацію. Серед цих підходів, формування аморфних твердих дисперсій (АТД) визнано однією з найефективніших та промислово застосовуваних технологій [3, 4].

Ідея твердих дисперсій полягає у диспергуванні однієї або декількох діючих речовин у інертному носії або матриці у твердому стані. Переведення кристалічного АФІ в аморфну форму значно підвищує його вільну енергію, що призводить до суттєвого збільшення уявної розчинності та швидкості розчинення. Технологічний прогрес перетворив методи отримання АТД: від класичних solvent-based методів (випаровування розчинника, розпилювальне сушіння) до сучасних solvent-free підходів, таких як екструзія гарячого розплаву (Hot Melt Extrusion, HME) та спільне подрібнення (co-milling) [5–7].

Спільне подрібнення (co-milling) є винятково привабливим методом у фармацевтичній промисловості завдяки його технологічній простоті, економічності та повній відсутності органічних розчинників. Це робить його екологічно чистим та безпечним варіантом порівняно з традиційними методами, що часто вимагають використання токсичних розчинників та складних етапів їх утилізації.

У цьому варіанті процесу, спільне подрібнення являє собою термо-механічний процес, де активна фармацевтична інгредієнта (АФІ) та полімер змішуються у твердому стані. Взаємодія між цими компонентами відбувається під впливом високої швидкості зсуву та значного тепла, що генерується тертям. Це інтенсивне механічне та

термічне навантаження створює унікальні умови для модифікації властивостей АФІ. Механізм підвищення розчинності при спільному подрібненні є багатофакторним і включає не лише зменшення розміру частинок та збільшення питомої площі поверхні, але й, що найважливіше, часткову або повну аморфізацію АФІ внаслідок високої механічної енергії. Це руйнує кристалічну ґратку речовини, а гідрофільний полімерний носій стабілізує утворену аморфну фазу, запобігаючи рекристалізації, та покращує змочуваність поверхні частинок [8].

Вибір полімерного носія має вирішальне значення. Наприклад, при спільному подрібненні мефенамінової кислоти меглумін забезпечує вищу швидкість розчинення порівняно з полівінілпіролідом (PVP), навіть без повної аморфізації [9]. Це вказує на те, що крім фазових переходів, важливу роль відіграють специфічні міжмолекулярні взаємодії, зокрема утворення солей *in situ*, що кардинально змінює фізико-хімічні властивості АФІ [10].

Різноманітність носіїв, що використовуються для мефенамінової кислоти, підкреслює гнучкість технології твердих дисперсій. Дослідження показують ефективність використання таких носіїв, як Avicel PH-101, що покращує розчинення за рахунок утворення водневих зв'язків та високої змочуваності [11]. Інші роботи демонструють успішне застосування поліетиленгліколю (PEG 4000) при отриманні твердих дисперсій методом замішування, що також значно прискорює вивільнення діючої речовини [12].

Молекулярні взаємодії між АФІ та носієм є фундаментальним фактором стабілізації системи. Дослідження, де вивчалися системи мефенамінової кислоти з PVP K12, отримані кріоподрібненням, за допомогою Фур'є-спектроскопії підтвердили утворення водневих зв'язків між компонентами [13]. Ця взаємодія є основою до запобігання рекристалізації та забезпечення стабільного підвищення розчинності.

Поряд із спільним подрібненням активно розвиваються й інші технології. Екструзія гарячого розплаву (HME) вже довела свою ефективність для мефенамінової кислоти, дозволяючи отримати стабільні аморфні дисперсії з гідроксипропілметилцелюлози як носієм [14].

Особливий інтерес викликає інноваційна технологія KinetiSol® – високошвидкісний процес, що не використовує розчинників і базується на енергії тертя та зсуву. Завдяки надзвичайно короткому часу обробки (зазвичай менше 20 секунд)

KinetiSol дозволяє успішно аморфізувати термолабільні АФІ та речовини з високою температурою плавлення, які важко обробити методом НМЕ. Ця технологія сумісна з широким спектром полімерів (гідроксипропілметилцелюлоза, коповідон, Soluplus®) і дозволяє створювати унікальні комбінації АФІ-полімер, що відкриває нові горизонти для розробки препаратів з покращеною біодоступністю [15].

Для всебічної характеристики твердих дисперсій застосовують комплекс фізико-хімічних методів. Диференціальна скануюча калориметрія (DSC) є стандартом для оцінки фазового стану системи. Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR) незамінна для виявлення міжмолекулярних взаємодій. Мікроскопія візуалізує морфологічні зміни [16–18].

Таким чином, формування аморфних твердих дисперсій є однією з провідних та промислово реалізованих стратегій для вирішення проблеми низької розчинності лікарських засобів. Метод спільного подрібнення виділяється своєю економічністю, екологічністю та ефективністю, що підтверджено численними дослідженнями на прикладі НПЗЗ, зокрема мефенамінової кислоти. Успіх технології залежить від правильного вибору полімерного носія та глибокого розуміння фізико-хімічних взаємодій у системі, що вимагає залучення комплексу сучасних аналітичних методів.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення розчинення малорозчинних активних фармацевтичних інгредієнтів протизапальної дії шляхом спільного подрібнення з полімерними носіями, а також характеристика отриманих композиційних матеріалів із застосуванням спектрофотометричного аналізу, FTIR-спектроскопії, диференціально-сканувальної калориметрії (DSC) та оптичної мікроскопії.

Для досягнення поставленої мети в рамках даного дослідження було визначено такі завдання:

1. Одержати композиційні матеріали на основі малорозчинного активного фармацевтичного інгредієнта протизапальної дії та полімерних носіїв методом спільного подрібнення.
2. Оцінити вплив спільного подрібнення на розчинення активного фармацевтичного інгредієнта за допомогою спектрофотометричного аналізу.
3. Дослідити можливі фізико-хімічні взаємодії між АФІ та полімерними носіями за допомогою FTIR-спектроскопії.
4. Визначити термічні характеристики композиційних матеріалів з використанням диференціально-сканувальної калориметрії.

5. Оцінити морфологічні зміни та однорідність сумішей за допомогою оптичної мікроскопії.

Виклад основного матеріалу. Мефенамінова кислота (МА) є діючою речовиною, що належить до групи нестероїдних протизапальних засобів (НПЗЗ) [19–21]. Білий або майже білий, мікрористалічний порошок, без запаху. Температура плавлення 230–231 °С. Практично не розчиняється у воді, слабо розчиняється в етанолі, хлороформі, ефірі. Розчиняється в розчинах гідроксидів лужних металів. В роботі використано мефенамінову кислоту виробника Shaanxi Baoxin Pharmaceutical co. Ltd, Китай.

Інші вихідні компоненти, що були використані для отримання ТДС: Полівінілпіролідон K12 (PVP K12) (ISP, США), Гідроксипропілметилцелюлоза Methocel E5 Premium LV (HPMC 5 мПа·с) (Nutrition & Biosciences (UK) Ltd., США), Гідроксипропілцелюлоза (HPC) (Nippon, Японія), Маніт (Манітол) (Pearlitol 160 C Roquette Freres, Франція), Полісорбат-80 (Twin-80) (Merck KGaA, Німеччина), Цетилпиридинію хлорид (CPC) (Unilab Chemicals & Pharmaceuticals PVT. Ltd, Індія).

Якість вихідних речовин відповідає монографіям Європейської Фармакопеї (ЄФ) та Державної Фармакопеї України (ДФУ) діючого видання.

Приготування твердої дисперсної системи мефенамінової кислоти на полімерних носіях. З метою підвищення розчинності практично нерозчинної у воді мефенамінової кислоти було розроблено серію твердих дисперсних систем (ТДС) методом спільного подрібнення. Як фармацевтично прийнятні полімерні носії було обрано гідроксипропілметилцелюлозу (HPMC), гідроксипропілцелюлозу (HPC) та полівінілпіролідон (PVP). Для оптимізації технологічних властивостей та посилення ефекту солюбілізації до складу окремих композицій вводили допоміжні речовини: манітол, полісорбат 80 (Twin 80) та цетилпиридинію хлорид (CPC).

Загалом було виготовлено дев'ять композицій ТДС, у кожній з яких вміст активного фармацевтичного інгредієнта (АФІ) залишався незмінним. Базові складки включали бінарні системи АФІ з кожним із полімерів. Подальші варіації передбачали додавання манітолу до кожної з трьох базових систем, а також включення цетилпиридинію хлориду до систем на основі похідних целюлози та полісорбату 80 до системи з PVP.

Бінарні та трикомпонентні ТДС мефенамінової кислоти отримували шляхом спільного подрібнення на ультрацентрифужному млині Retsch ZM 200, що використовує принцип ударного та

зсувного подрібнення (рис. 1). Матеріал надходить у камеру подрібнення, де швидко обертається ротор. Частинки матеріалу відкидаються до кільцевого сита, де вони багаторазово ударяються об зуби ротора та внутрішню поверхню сита, подрібнюючись до тих пір, поки їх розмір не стане меншим за розмір отворів сита. Це забезпечує швидке та м'яке подрібнення, запобігаючи надмірному нагріванню зразка.



Рис. 1. Фото ультрацентрифужного млина Retsch ZM 200

Швидкість ротора – 8000 об/хв; діаметр отворів сітки – 200 мкм; час помелу – 60 с; кількість порошку для помелу – 150 г.

Для кожної отриманої системи було розраховано коефіцієнт підвищення розчинності мефенамінової кислоти у воді порівняно з чистою субстанцією.

Для дослідження розчинення композиційні матеріали, що містили мефенамінову кислоту, зважували у пробірки типу Eppendorf. До кожної проби додавали 1 мл очищеної води та проводили перемішування на термошейкері при температурі $(37 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ зі швидкістю 1000 об/хв протягом 30 хвилин. Після цього зразки центрифугували протягом 20 хвилин за тієї ж частоти (1000 об/хв).

По завершенню центрифугування вміст мефенамінової кислоти у надосадовій рідині визначали за допомогою спектрофотометричного аналізу при довжині хвилі $\lambda = 282$ нм. Кількісний аналіз проводили з використанням попередньо побудованого калібрувального графіка. В якості розчину порівняння застосовували очищену воду.

Результати експериментальних досліджень представлені в табл. 1. Аналіз бінарних систем (АФІ : полімер) показав, що ТДС на основі НРМС та РVP продемонстрували порівнянне зростання розчинності – у 30,48 та 37,86 разів відповідно. Водночас система на основі НРС виявилася значно ефективнішою, забезпечивши збільшення розчинності у 60,75 разів, що майже вдвічі перевищує показники для НРМС та РVP.

Дослідження впливу манітолу на ефективність ТДС показало різноспрямовані результати. Його введення до систем на основі похідних целюлози не спричинило суттєвих змін у солубілізуючому ефекті, підвищивши розчинність у 36,29 та 59,33 разів відповідно. Натомість, у композиції з РVP додавання манітолу призвело до зниження показника підвищення розчинності субстанції до 23,22 разів.

Найбільший приріст розчинності (у 71,24 рази) було зафіксовано для трикомпонентної системи МА : НРМС : НРС, що є найкращим результатом

Таблиця 1

Результати збільшення розчинності мефенамінової кислоти у спільно подрібнених композиціях твердих дисперсних систем

№	Компоненти ТДС	Співвідношення компонентів (мас.)	Коефіцієнт збільшення розчинності мефенамінової кислоти у воді для композицій ТДС, рази
1	МА : НРМС	5 : 95	30,48 $\pm$ 0,07
2	МА : НРМС : Manit	5 : 85 : 10	36,29 $\pm$ 0,06
3	МА : НРМС : CPC	5 : 94,9 : 0,1	71,24 $\pm$ 0,14
4	МА : НРС	5 : 95	60,75 $\pm$ 0,06
5	МА : НРС : Manit	5 : 85 : 10	59,33 $\pm$ 0,06
6	МА : НРС : CPC	5 : 94,5 : 0,5	46,09 $\pm$ 0,08
7	МА : РVP	5 : 95	37,86 $\pm$ 0,04
8	МА : РVP : Manit	5 : 85 : 10	23,22 $\pm$ 0,02
9	МА : РVP : Twin 80	5 : 94,9 : 0,1	4,86 $\pm$ 0,01

МА – мефенамінова кислота; НРМС – гідроксипропілметилцелюлоза (Е6); НРС – гідроксипропілцелюлоза; РVP – полівінілпіролідон (K12); CPC – цетипиридинію хлорид

у даному дослідженні. Проте, для системи з НРС додавання цетилпиридинію хлориду мало протилежний ефект, знизивши коефіцієнт підвищення розчинності до 46,09 разів порівняно з бінарною системою. Найменш ефективною виявилася система на основі PVP з полісорбатом-80, де розчинність зросла лише в 4,86 раза, що свідчить про ймовірні негативні взаємодії між компонентами у твердому стані.

Проведений порівняльний аналіз ефективності дев'яти розроблених ТДС мефенамінової кислоти дозволив обрати композиції, що забезпечили найбільше підвищення розчинності АФІ. До цієї групи увійшли всі досліджені системи на основі похідних целюлози, а також бінарна система МА : PVP.

Метод диференціальної скануючої калориметрії. Термічний аналіз методом диференціальної скануючої калориметрії (DSC), надає інформацію про процеси плавлення, кристалізації, розкладання або зміни кристалічної фази внаслідок впливу теплової енергії. Цей метод був використаний для відстеження змін теплових характеристик окремих компонентів.

Термічний аналіз зразків проводили за допомогою диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) (калориметр DSC Q2000, TA Instruments,

США). Зразки чистого активного фармацевтичного інгредієнта (АФІ), носіїв, поверхнево-активних речовин та ТДС (~5 мг) зважували та поміщали в алюмінієві тиглі, які накривали кришкою та нагрівали в приладі зі швидкістю 10 °С/хв від 20 °С до 300 °С (400 °С для окремих зразків) в середовищі сухого азоту. Як контрольний зразок використовували порожній тигель, закритий кришкою. Дані аналізували за допомогою TA Universal.

DSC-термограми вихідних досліджуваних зразків мефенамінової кислоти, носіїв та допоміжних речовин показано на рис. 2. Термічний аналіз ТДС було проведено для відстеження фізичних та хімічних змін, що відбувалися під час процесу спільного подрібнення (рис. 3).

Згідно з графічними даними, кожна речовина демонструє унікальну термічну поведінку. Мефенамінова кислота показує дуже гострий та інтенсивний ендотермічний пік із максимумом приблизно при 232 °С. Такий різкий пік є характерним для плавлення висококристалічної речовини та вказує на високу енергію кристалічної ґратки, що узгоджується з літературними даними про її температуру плавлення.

Полівінілпіролідон демонструє дуже широкий ендотермічний перехід у діапазоні температур від

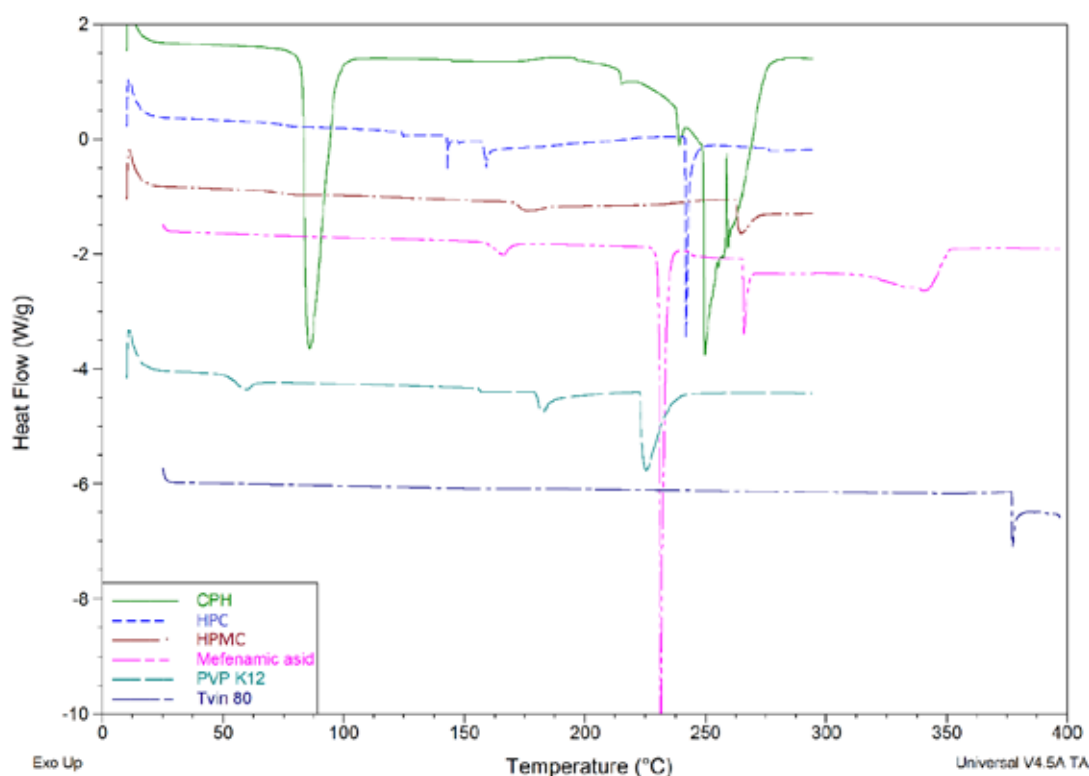


Рис. 2. Термограми вихідних компонентів, отриманих методом диференціальної скануючої калориметрії

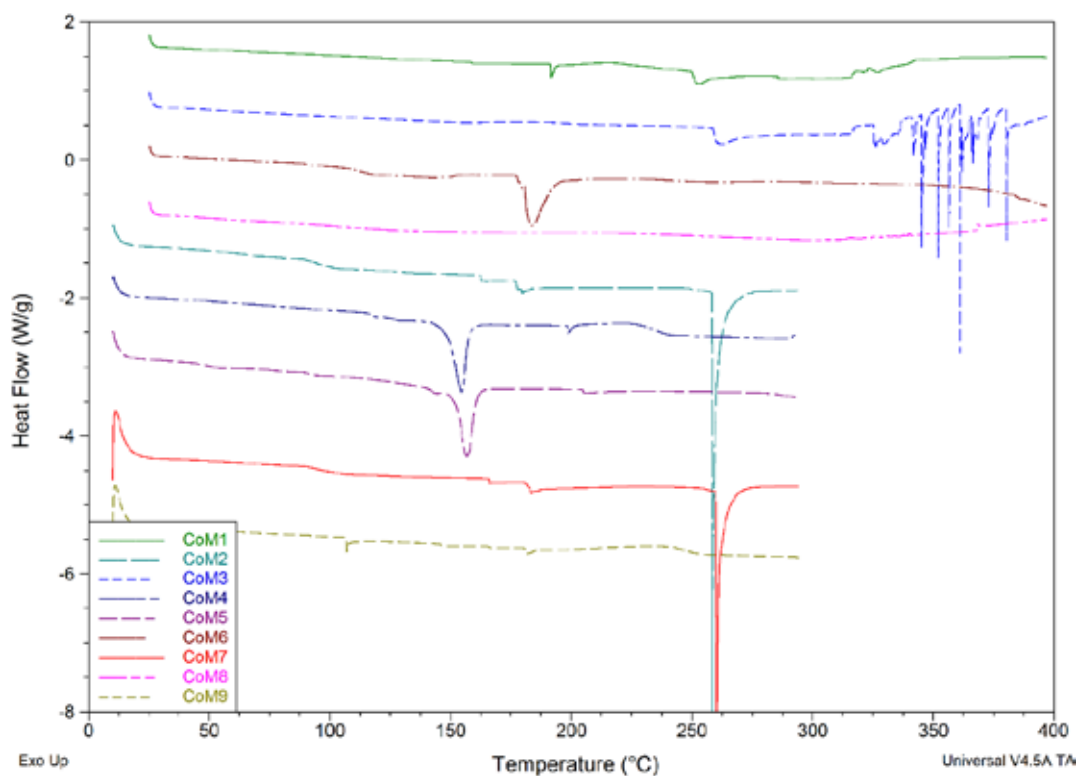


Рис. 3. Термограми твердих дисперсних систем, отриманих методом диференціальної скануючої калориметрії

40 °C до 120 °C. Це типова поведінка для аморфних гігроскопічних полімерів, де широкий пік відповідає процесу дегідратації (втраті зв'язаної води), а не плавленню. Відсутність гострого піку плавлення підтверджує аморфну природу полівінілпіролідону.

Полівінілпіролідон демонструє дуже широкий ендотермічний перехід у діапазоні температур від 40 °C до 120 °C. Це типова поведінка для аморфних гігроскопічних полімерів, де широкий пік відповідає процесу дегідратації (втраті зв'язаної води), а не плавленню. Відсутність гострого піку плавлення підтверджує аморфну природу полівінілпіролідону.

Цетилпіридинію хлорид має виражений ендотермічний пік плавлення при температурі близько 90 °C, що свідчить про його кристалічну структуру. Другий, менш інтенсивний ендотермічний ефект спостерігається при ~250 °C, що, ймовірно, пов'язано з термічним розкладанням речовини.

Гідроксипропілцелюлоза показує складний термічний профіль. Спочатку спостерігається широкий ендотермічний ефект при низьких температурах (ймовірно, дегідратація), після чого слідує серія гострих ендотермічних піків у діапазоні 230–250 °C. Така поведінка може свідчити

про плавлення, яке супроводжується одночасним розкладанням, що характерно для складних органічних сполук.

Гідроксипропілметилцелюлоза також демонструє складну термічну поведінку з кількома ендотермічними подіями, зокрема з піками біля 175 °C та 250 °C. Це може вказувати на наявність кількох фазових переходів або на те, що зразок є сумішшю чи напівкристалічним полімером.

Полісорбат-80 показує відносно пласку криву без значних ендотермічних піків у досліджуваному діапазоні до ~350 °C. Це очікувано, оскільки полісорбат-80 є рідиною за кімнатної температури і не має точки плавлення. Невеликий ендотермічний зсув при високих температурах (вище 370 °C) свідчить про початок термічної деградації.

Загальною рисою усіх досліджених твердих дисперсій є відсутність характерного гострого ендотермічного піка плавлення чистої кристалічної мефенамінової кислоти при 232 °C. Це може бути результатом її перетворення в аморфний стан або рівномірного молекулярного диспергування (розчинення) в полімерній матриці.

У більшості багатокомпонентних твердих дисперсій (манітолвмісні ТДС, а також система МА : PVP) спостерігається поява нового ендотер-

мічного переходу, пов'язаного з температурою склування (T_g). Цей пік є характерним для аморфних матеріалів і вказує на перехід від склоподібного (жорсткого) до високорухомого (гумоподібного) стану при нагріванні.

У зразку МА : PVP спостерігається важлива особливість: невелика екзотермічна подія близько 260–270 °С. Цей пік є проявом холодної кристалізації, що свідчить про те, що аморфна мефенамінова кислота, сформована в дисперсії, починає рекристалізуватися при нагріванні. Це критичний момент, оскільки холодна кристалізація вказує на те, що аморфна форма є кінетично стабільною, але термодинамічно нестабільною і схильна повертатися до більш стабільного кристалічного стану при певних умовах (у даному випадку – при підвищенні температури). Після екзотермічного піка холодної кристалізації може слідувати ендотермічний пік плавлення новоутворених кристалів, що підтверджує цей процес. Така поведінка є попередженням щодо довгострокової фізичної стабільності даної ТДС.

У деяких твердих дисперсіях при високих температурах спостерігаються термічні події, пов'язані з розкладанням компонентів: для МА : НРС : СРС помітні дрібні, гострі ендотер-

мічні піки, що починаються приблизно з 340 °С і продовжуються до 380 °С.

Метод інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є. Метод ІЧ-спектроскопії з Фур'є-перетворенням (FTIR) дозволяє ідентифікувати функціональні групи в молекулах та аналізувати взаємодії між ними.

Спектри інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR) чистої мефенамінової кислоти, носіїв, поверхнево-активних речовин та утворених ТДС були отримані за допомогою алмазно-кристалічного ATR FTIR спектрометра Nicolet IS50 (Thermo Fisher Scientific, США). FTIR-спектри ТДС та їх компонентів були записані в діапазоні хвильових чисел 4000–400 cm^{-1} з 32 скануваннями з роздільною здатністю 2 cm^{-1} .

Порівнюючи спектр твердої дисперсної системи зі спектрами вихідних компонентів (мефенамінової кислоти, полімерів тощо), можна зробити висновок про наявність або відсутності хімічних взаємодій. На спектрі окремих речовин можна виділити ключові піки для аналізу (рис. 4).

Мефенамінова кислота має чіткий, гострий пік ($\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$), що відповідає валентним коливанням зв'язку (N-H) у вторинній аміногрупі; дуже інтенсивний пік від валентних коливань

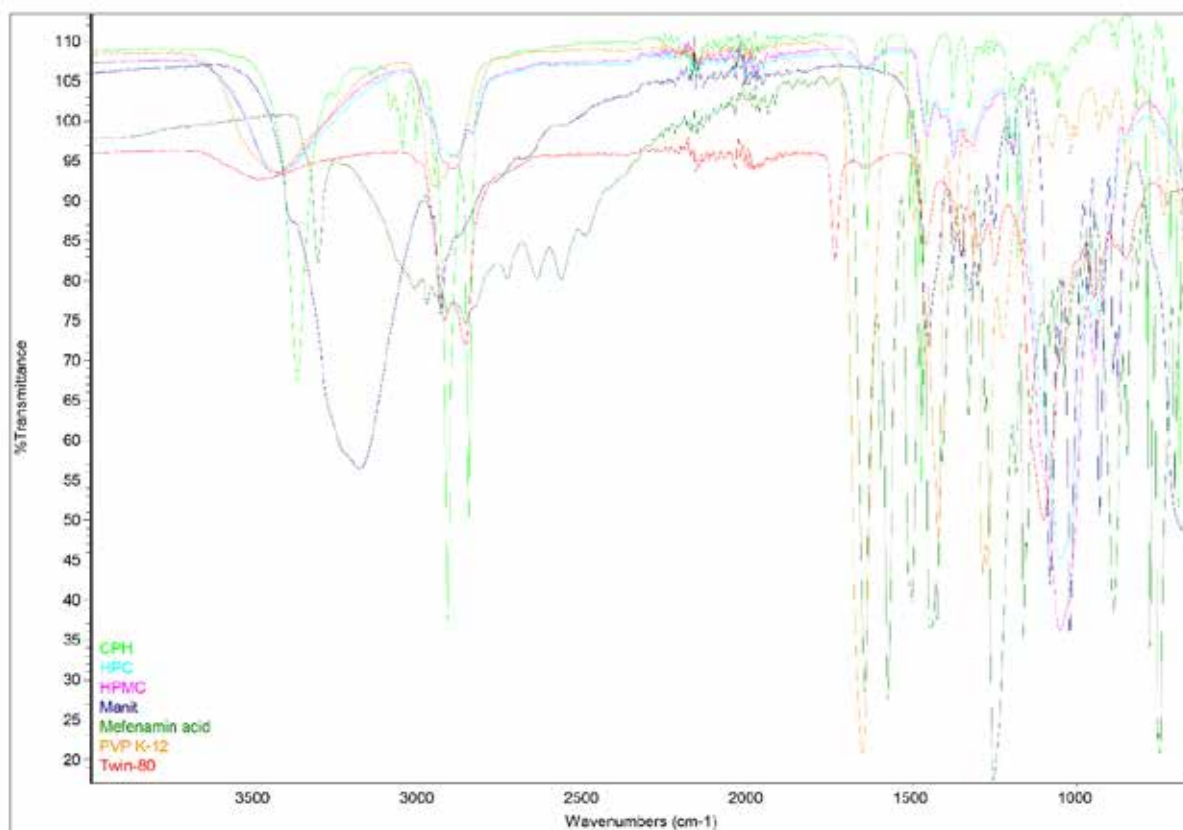


Рис. 4. FTIR-спектри вихідних компонентів

карбонільної групи ($\text{C}=\text{O}$) в карбоксильній кислоті ($\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$); дуже широку смугу поглинання, характерну для водневих зв'язків ($\text{O}-\text{H}$) у димерах карбонових кислот ($\sim 3300\text{--}2500 \text{ cm}^{-1}$).

Полімери НРМС та НРС мають дуже широку смугу в області $\sim 3450 \text{ cm}^{-1}$, що відповідає коливанням гідроксильних груп ($-\text{OH}$), а також інтенсивні піки ($\text{C}-\text{O}$) зв'язків в області $1200\text{--}1000 \text{ cm}^{-1}$.

Полімер РVP характеризується відсутністю смуги ($-\text{OH}$) груп, але має дуже сильний пік поглинання карбонільної групи аміду ($\text{C}=\text{O}$) приблизно при 1650 cm^{-1} .

При порівнянні спектрів твердих дисперсних систем зі спектром чистої мефенамінової кислоти спостерігаються ключові зміни у всіх дев'яти зразках. Характерний гострий пік зв'язку ($\text{N}-\text{H}$) мефенамінової кислоти при $\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$ зникає (рис. 5). Він розширюється і зливається із загальною широкою смугою поглинання ($-\text{OH}$) груп полімерів. Це є прямим доказом того, що група ($\text{N}-\text{H}$) мефенамінової кислоти утворює водневий зв'язок з полімером.

Широка смуга поглинання карбоксильних димерів мефенамінової кислоти ($3300\text{--}2500 \text{ cm}^{-1}$) повністю зникає у всіх спектрах твердих дисперсій. Це означає, що водневі зв'язки між молеку-

лами самої кислоти були розірвані. Пік карбонільної групи мефенамінової кислоти ($\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$) або зсувається, або його інтенсивність змінюється, або він перекривається інтенсивним піком ($\text{C}=\text{O}$) від РVP.

Спостережувані зміни у спектрах (зникнення піків ($\text{N}-\text{H}$) та ($\text{O}-\text{H}$) димерів мефенамінової кислоти) свідчать про те, що відбулася руйнація кристалічної ґратки субстанції та утворилися нові зв'язки. Групи ($-\text{COOH}$) та ($-\text{NH}-$) мефенамінової кислоти (які є донорами протона) утворюють водневі зв'язки з атомами кисню в полімерах (які є акцепторами протона). У целюлозовмісних системах зв'язки утворюються з киснем гідроксильних ($-\text{OH}$) та етерних ($-\text{O}-$) груп. У системах з РVP зв'язки утворюються переважно з киснем карбонільної групи ($\text{C}=\text{O}$).

Метод оптичної мікроскопії. Мікрофотографії вихідних компонентів та твердих композицій отримували за допомогою мікроскопу BX51 (Olympus, Японія).

Частинки субстанції мефенамінової кислоти мають неправильну, кутасту форму (рис. 6). Вони не є гладкими чи сферичними, що вказує на кристалічну або аморфно-кристалічну природу порошку. Спостерігається широкий розподіл час-

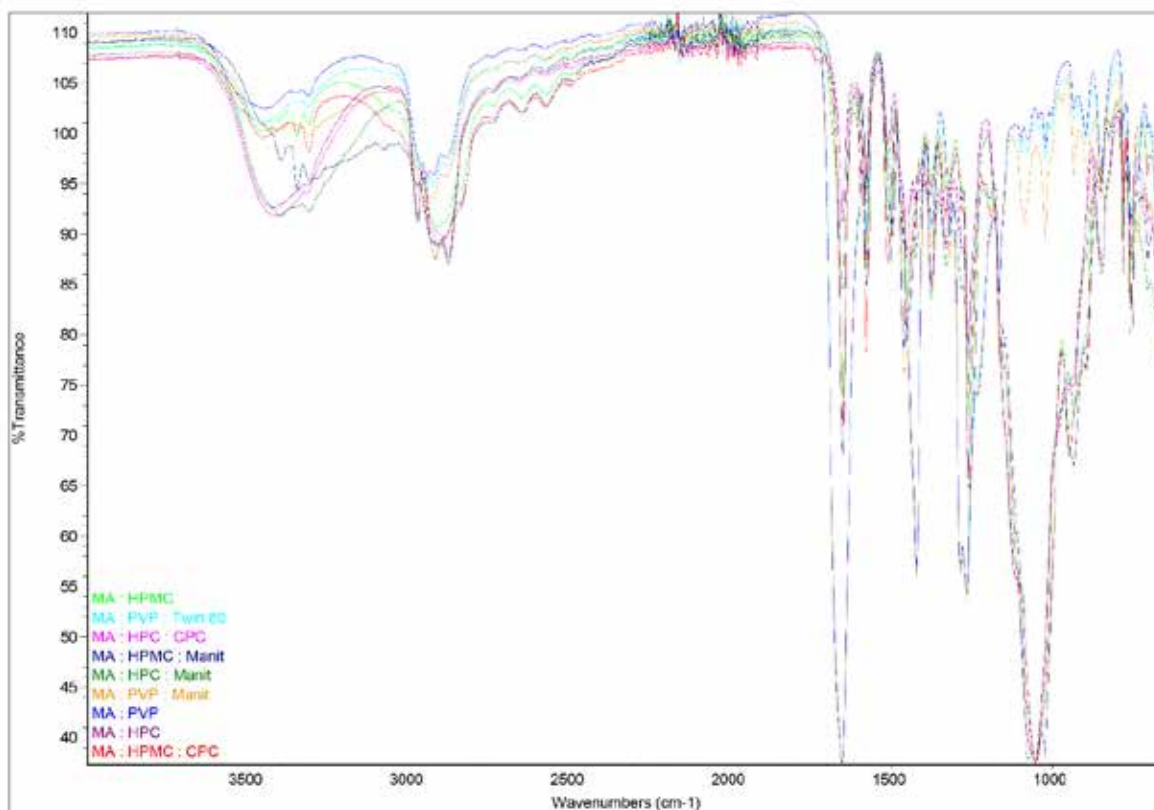


Рис. 5. FTIR-спектри твердих дисперсних систем

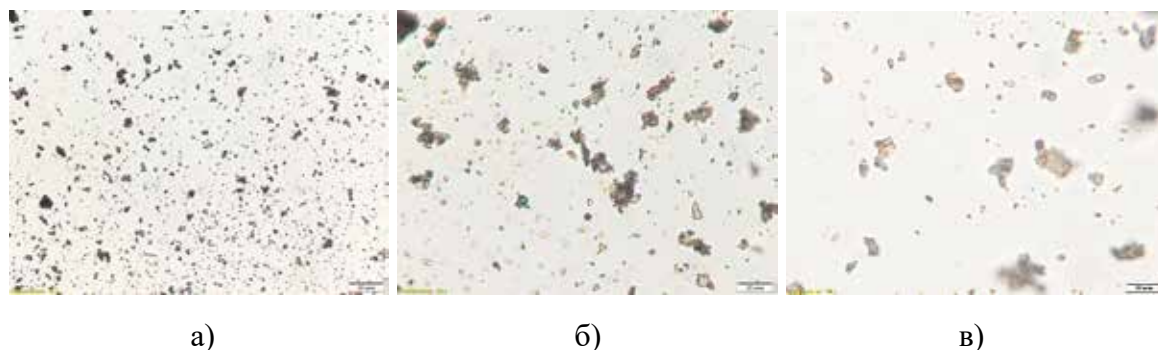


Рис. 6. Мікрофотографії мефенамінової кислоти в полях зору:
а) 565х425 мкм; б) 226х170 мкм; в) 113х85 мкм

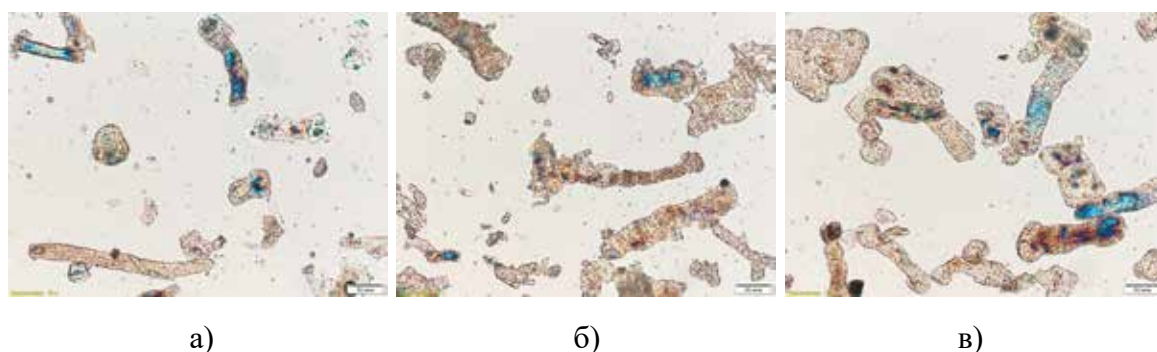


Рис. 7. Мікрофотографії твердих дисперсних систем в полі зору 565х425 мкм:
а) МА : НРМС; б) МА : НРМС : Manit; в) МА : НРМС : СРС

тинок за розміром. Присутні як дуже дрібні частинки (кілька мікрометрів), так і значно більші агрегати. Розмір найбільших скупчень приблизно в 50–70 мкм. Частинки схильні до сильної агрегації та агломерації. Вони утворюють численні скупчення різного розміру, що складаються з менших індивідуальних кристалів.

При використанні в якості носіїв похідних целюлози (НРМС та НРС) – були отримані ТДС зі складною гетерогенною структурою. Це свідчить про обмежену змішуваність мефенамінової кислоти з даними полімерами на молекулярному рівні. У всіх випадках лікарська речовина існує у вигляді окремої фази, розподіленої в полімерній матриці.

ТДС на основі НРМС демонструють унікальну та стабільно відтворювану морфологію у вигляді великих (часто >100 мкм) видовжених, волокнистих або «червоподібних» композитних частинок (рис. 7). Структура є двофазною: напівпрозора матриця та чітко видимі включення мефенамінової кислоти у вигляді інтенсивно забарвлених скупчень. Важливо зазначити, що введення до системи третіх компонентів – манітолу чи цетилпіридинію хлориду – не справило суттєвого

впливу на загальну морфологію та гетерогенність системи. Мефенамінова кислота, як і раніше, залишалася у вигляді окремих доменів. Це вказує на те, що в даних умовах ці допоміжні речовини не змогли подолати термодинамічну несумісність компонентів та виступити в ролі ефективних гомогенізаторів.

ТДС на основі НРС також є гетерогенними, однак їхня морфологія відрізняється від систем з НРМС (рис. 8). Частинки мають вигляд пластівчастих уламків неправильної форми. Як і у випадку з НРМС, спостерігається чіткий поділ на фази: світла матриця та розподілені в ній темні включення мефенамінової кислоти. Це підтверджує, що субстанція переважно інкапсульована в полімері, а не розчинена в ньому. Додавання манітолу чи цетилпіридинію хлориду не призвело до утворення гомогенної системи.

Кардинально інша картина спостерігалася при використанні PVP як полімеру-носія. У всіх випадках були отримані гомогенні системи, що свідчить про високу спорідненість та добру змішуваність полівінілпіролідону з мефенаміновою кислотою. Частинки ТДС на основі PVP мають вигляд прозорих, склоподібних уламків з гострими краями,

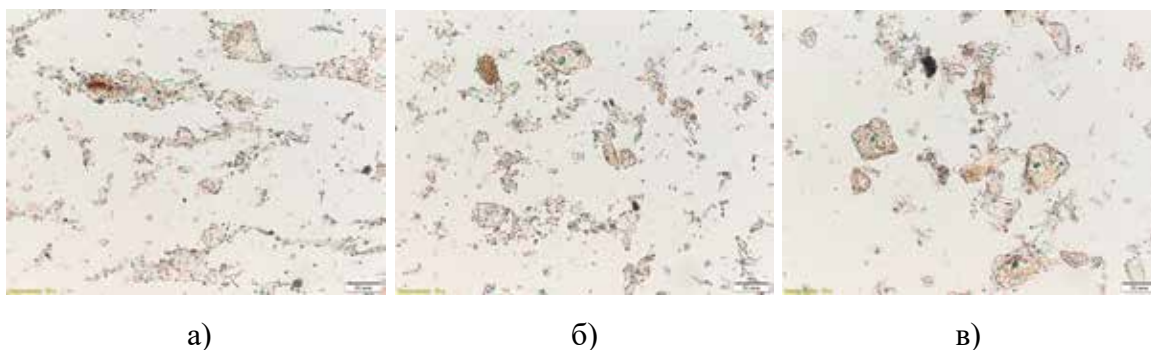


Рис. 8. Мікрофотографії твердих дисперсних систем в полі зору 565x425 мкм:
а) MA : HPC; б) MA : HPC : Maniit; в) MA : HPC : CPC

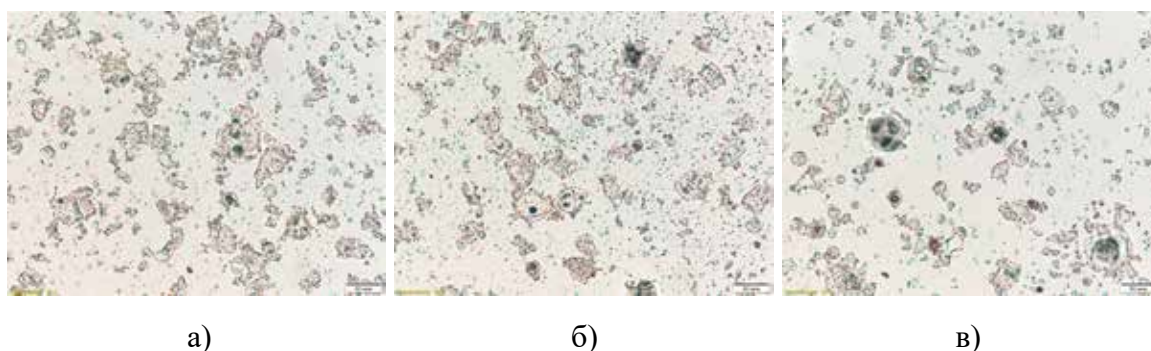


Рис. 9. Мікрофотографії твердих дисперсних систем в полі зору 565x425 мкм:
а) MA : PVP; б) MA : PVP : Maniit; в) MA : PVP : Twin 80

що є характерною ознакою аморфного твердого тіла (рис. 9). Відсутність видимих кристалів чи окремих фаз лікарської речовини вказує на те, що відбулася ефективна аморфізація мефенамінової кислоти та формування твердого розчину, де молекули лікарської речовини розподілені в полімерній матриці на молекулярному рівні. Ймовірно, це зумовлено утворенням міцних міжмолекулярних зв'язків (наприклад, водневих) між карбонільними групами PVP та функціональними групами мефенамінової кислоти.

Введення манітолу або полісорбату-80 не порушило однорідності системи, а лише інтегрувалося в загальну аморфну матрицю.

Проведене мікроскопічне дослідження показало, що вибір полімеру-носія є вирішальним фактором, що визначає фізичний стан та структуру ТДС мефенамінової кислоти. Похідні целюлози формують гетерогенні системи, де мефенамінова кислота інкапсульована у вигляді окремої фази. При цьому морфологія частинок залежить від типу полімеру (видовжена для НРМС та пластівчаста для НРС). Полівінілпіролідон виступає як ефективний носій для повної аморфізації мефенамінової кислоти з утворенням гомогенного твер-

дого розчину, що має вигляд прозорих склоподібних частинок.

Таким чином, для отримання аморфної форми мефенамінової кислоти з метою потенційного підвищення її розчинності та біодоступності, PVP є значно ефективнішим носієм порівняно з НРМС та НРС.

Висновки. У ході дослідження було успішно отримано дев'ять композицій твердих дисперсних систем (ТДС) на основі мефенамінової кислоти методом спільного подрібнення, що дозволило значно підвищити її розчинність у водному середовищі. Комплексний аналіз із застосуванням DSC, FTIR та оптичної мікроскопії виявив, що вибір полімерного носія є вирішальним фактором, який визначає фізичну структуру, стабільність та ефективність ТДС. Усі системи можна умовно розділити на дві основні групи залежно від їх морфології та фізико-хімічних властивостей – гомогенні аморфні системи на основі полівінілпіролідону та гетерогенні системи інкапсульованого типу на основі похідних целюлози (НРМС та НРС).

Дані оптичної мікроскопії показали, що PVP виступає як ефективний гомогенізатор, утворюючи прозорі, склоподібні частинки без видимих

включень кристалічної мефенамінової кислоти. Це свідчить про повну аморфізацію та формування молекулярно-дисперсної системи (твердого розчину). Результати DSC підтвердили це, продемонструвавши повне зникнення ендотермічного піка плавлення мефенамінової кислоти (~232 °C) та появу температури склування (Tg). Однак для бінарної системи МА : PVP було зафіксовано пік холодної кристалізації, що вказує на її потенційну фізичну нестабільність при зберіганні. Дані ІЧ-спектроскопії підтвердили розрив водневих зв'язків у димерах кислоти та утворення нових, міцних водневих зв'язків між функціональними групами субстанції та карбонільними групами PVP, що є рушійною силою аморфізації. Попри досягнення повної гомогенності, приріст розчинності для цих систем був помірним (від 4,86 до 37,86 разів).

На відміну від полівінілпіролідону, похідні целюлози утворювали гетерогенні, двофазні системи, що було чітко видно на мікрофотографіях. Мефенамінова кислота існувала у вигляді

окремих доменів, інкапсульованих у полімерній матриці, яка мала характерну морфологію: видовжену, «червоподібну» для НРМС та пластівчасту для НРС. Попри візуальну гетерогенність, дані DSC для цих систем також показали повне зникнення піка плавлення АФІ, що свідчить про її перехід в аморфний стан всередині полімерної матриці. ІЧ-спектроскопія підтвердила утворення водневих зв'язків між мефенаміновою кислотою та гідроксильними/етерними групами целюлозних полімерів. Парадоксально, але саме в цій групі гетерогенних систем були досягнуті найвищі показники підвищення розчинності. Найкращий результат продемонструвала композиція МА : НРМС : СРС, збільшивши розчинність у 71,24 рази, а бінарна система МА : НРС – у 60,75 разів. Це вказує на те, що механізм підвищення розчинності в даних системах є комплексним і включає не лише аморфізацію, але й ефективну інкапсуляцію, запобігання агрегації частинок та покращення змочуваності завдяки гідрофільній полімерній матриці.

Список літератури:

1. Shukla S., Sivakumar M., Srinivasan K. et al. Improving Bioavailability and Solubility of Poorly Soluble Drugs – A systematic review. *Journal of Neonatal Surgery*. 2025. Vol. 14. № 32s. P. 2678-2684.
2. Challener C.A., Enhancing Solubility and Bioavailability with Nanotechnology. *Pharmaceutical Technology*. 2025. Vol. 49. № 3. P. 16-19.
3. Patel, K., Shah, S., & Patel, J. Solid dispersion technology as a formulation strategy for the fabrication of modified release dosage forms: A comprehensive review. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2022. Vol. 30 No. 1. P. 165-189. DOI: 10.1007/s40199-022-00440-0.
4. Bhujbal S. V., Mitra B., Jain U. et al. Pharmaceutical amorphous solid dispersion: A review of manufacturing strategies. *Acta Pharmaceutica Sinica B*. 2021. Vol. 11. № 8. P. 2505-2536. DOI: 10.1016/j.apsb.2021.05.014.
5. Giri B. R., Kwon J., Vo A. Q. et al. Hot-melt extruded amorphous solid dispersion for solubility, stability, and bioavailability enhancement of telmisartan. *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 14. № 1. DOI: 10.3390/ph14010073.
6. Mahmoud, A. A. K., Regdon, G., Jr., & Kristó, K. Cutting-Edge Approaches in the Co-Amorphization Process. *Pharmaceutics*. 2025. Vol. 17. No 7. DOI: 10.3390/pharmaceutics17070850.
7. Shi Q., Li F., Yeh S., et al. B. Recent advances in enhancement of dissolution and supersaturation of poorly water-soluble drug in amorphous pharmaceutical solids: A review. *Aaps Pharmscitech*. 2021. Vol. 23, No. 1. DOI: 10.1208/s12249-021-02137-0.
8. Slámová M., Prausová K., Epikaridisová et al. Effect of co-milling on dissolution rate of poorly soluble drugs. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021. Vol. 597. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2021.120312.
9. Kim D., Kim Y., Tin Y. Y. et al. Recent technologies for amorphization of poorly water-soluble drugs. *Pharmaceutics*. 2021, Vol. 13. No 8. DOI: 10.3390/pharmaceutics13081318.
10. Tambe S., Jain D., Meruva S. K. et al. Recent advances in amorphous solid dispersions: preformulation, formulation strategies, technological advancements and characterization. *Pharmaceutics*. 2022. Vol. 14. No 10. DOI: 10.3390/pharmaceutics14102203.
11. Putranti W., Widiyastuti L., Ulfani F. Enhancing the dissolution rate of mefenamic acid with solid dispersion system using avicel PH-101. *Pharmaciana*. 2019. Vol. 9. No 1. P. 119-128. DOI: 10.12928/pharmaciana.v%vi%i.10809.
12. Farsiya F., Fakeha F., Lavanya A. Formulation and evaluation of glibenclamide solid dispersions using kneading method. *World journal of pharmacy and pharmaceutical sciences*. 2019. Vol. 8, No 3. P. 1047-1062. DOI: 10.20959/wjpps20193-13293.
13. Dwi U., Ilma N., Slamet I. Formation and Characterization of Mefenamic acid-Nicotinamide Cocrystal during Co-milling based on X-ray Powder Diffraction Analysis. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*. 2016. Vol. 6. No 6. P. 75-81. DOI: 10.7324/JAPS.2016.601010.

14. Shukla A. Mefenamic Acid–HPMC AS HG Amorphous Solid Dispersions: Dissolution Enhancement Using Hot Melt Extrusion Technology. *Electronic Theses and Dissertations*. 2019.
15. AustinPx. Kinetisol – Next Generation Amorphous Dispersions. URL: <https://www.austinpx.com/kinetisol/> (дата звернення: 23.07.2025).
16. Karagianni A., Kachrimanis K., Nikolakakis I. Co-amorphous solid dispersions for solubility and absorption improvement of drugs: Composition, preparation, characterization and formulations for oral delivery. *Pharmaceutics*. 2018. Vol. 10. No 3. DOI: 10.24198/ijdp.v2i2.27123.
17. Ma X., & Williams III R. O. Characterization of amorphous solid dispersions: An update. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2019. Vol. 50. P. 113-124. DOI: 10.1016/j.jddst.2019.01.017.
18. Sakhiya D. C., Borkhataria C. H. A review on advancement of cocrystallization approach and a brief on screening, formulation and characterization of the same. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No 7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29057.
19. Mustafa H., Daud S., Sheraz S., et al. The Chemistry and Bioactivity of Mefenamic Acid Derivatives: A Review of Recent Advances. *Archiv der Pharmazie*. 2025 Vol. 358 No 5. DOI: 10.1002/ardp.70004.
20. Panchal N. K., & Sabina E. P. Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): A current insight into its molecular mechanism eliciting organ toxicities. *Food and Chemical Toxicology*. 2023. Vol. 172. DOI: 10.1016/j.fct.2022.113598.
21. Cristiano C., Cavanagh R. J., Crucitti V. C., et al. Multiple drug-delivery strategies to enhance the pharmacological and toxicological properties of Mefenamic acid. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2024. Vol. 175. DOI: 10.1002/ardp.70004.

Yaremenko V.V., Chorny O.O., Fedorenko V.V., Goy A.M., Gureyeva S.M., Lisovyi V.M.
ENHANCEMENT OF DISSOLUTION OF POORLY SOLUBLE ANTI-INFLAMMATORY ACTIVE PHARMACEUTICAL INGREDIENTS BY CO-GROUNDING WITH POLYMERIC CARRIERS

Low aqueous solubility is a key barrier to the therapeutic effectiveness of many active pharmaceutical ingredients (APIs), particularly non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs). The aim of this work was to improve the dissolution of mefenamic acid by creating amorphous solid dispersion systems (SDS) using a co-grinding method with various polymeric carriers. Nine compositions based on mefenamic acid with hydroxypropyl methylcellulose (HPMC), hydroxypropyl cellulose (HPC), and polyvinylpyrrolidone (PVP), as well as with the addition of excipients, were prepared. The obtained SDS were investigated using spectrophotometry, differential scanning calorimetry (DSC), Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, and optical microscopy. All prepared compositions demonstrated a significant increase in solubility compared to the pure substance. The highest increase – a 71.24-fold increase in solubility – was recorded for the three-component system: «mefenamic acid : HPMC : cetylpyridinium chloride». DSC analysis confirmed the complete transition of crystalline mefenamic acid into an amorphous state in all SDS, evidenced by the disappearance of its endothermic melting peak. FTIR spectroscopy data indicated the disruption of the API's crystal lattice and the formation of new hydrogen bonds between mefenamic acid and the polymeric carriers. Microscopy showed that PVP forms homogeneous, glassy solid solutions, while cellulose derivatives create heterogeneous systems where the amorphous active substance is encapsulated within the polymeric matrix. Thus, the co-grinding method is an effective, economical, and environmentally friendly technology for enhancing the solubility of mefenamic acid. It was established that heterogeneous encapsulated systems based on cellulose derivatives provide a higher degree of solubilization compared to homogeneous solid solutions based on PVP.

Key words: mefenamic acid, co-grinding, amorphous solid dispersions, dissolution enhancement, differential scanning calorimetry, FTIR spectroscopy.

Дата надходження статті: 25.07.2025

Дата прийняття статті: 07.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

ТРАНСПОРТ

УДК 656.13:502.131.1:005.334(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/35>

Абрамова Л.С.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Абрамова О.С.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Птиця Г.Г.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ІНТЕГРАЦІЯ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

У статті запропоновано концептуальний підхід до аудиту безпеки дорожнього руху (RSA), інтегрований із принципами сталого розвитку. На тлі глобальних викликів у сфері дорожнього руху – зокрема високих показників смертності, зростаючого попиту на міську мобільність і вразливості до кліматичних змін – автори стверджують, що RSA має еволюціонувати від вузько технічної процедури до міждисциплінарного інструмента стратегічного планування та управління ризиками. Запропонована модель включає три взаємопов'язані блоки оцінювання: економічний, соціальний та екологічний, кожен з яких підтримується системою вимірюваних індикаторів ефективності. Ці індикатори дозволяють зацікавленим сторонам оцінювати інфраструктурні проекти на всіх етапах – планування, реалізації та модернізації – крізь призму фінансової доцільності, соціальної інклюзивності та екологічної стійкості. Особливу увагу приділено узгодженості практик RSA із Цілями сталого розвитку (ЦСР), зокрема ЦСР 3 (Міцне здоров'я і благополуччя), ЦСР 8 (Гідна праця та економічне зростання), ЦСР 9 (Індустріалізація, інновації та інфраструктура), ЦСР 11 (Сталий розвиток міст і громад), ЦСР 13 (Боротьба зі зміною клімату) та іншими. У статті окреслено, як впровадження RSA сприяє не лише зниженню людських та економічних втрат від аварій, а й оптимізації інвестицій в інфраструктуру та посиленню екологічної стійкості у довгостроковій перспективі. В умовах післявоєнного відновлення України та нагальної потреби у реконструкції критичних транспортних систем, інтеграція RSA в національну транспортну та інфраструктурну політику забезпечує практичні інструменти для досягнення безпеки, ефективності та сталого розвитку. Дослідження підкреслює роль RSA як елементу системного управління для пріоритетного планування заходів, підвищення прозорості та налагодження міжсекторальної співпраці в реалізації національних і глобальних цілей розвитку.

Ключові слова: сталий розвиток, цілі сталого розвитку (ЦСР), аудит, безпека дорожнього руху, ефективність безпеки, транспортна інфраструктура.

Постановка проблеми. Сучасні міста стикаються з багаторівневими викликами, що пов'язані із забезпеченням безпеки дорожнього руху (БДР), зростанням інтенсивності транспортних потоків, урбанізацією та потребою в екологічно сталих рішеннях. За даними ВООЗ [1], щороку внаслідок дорожньо-транспортних пригод (ДТП) у світі гине близько 1,19 млн осіб, а від 20 до 50 млн отримують травми. Особливо вразливими залишаються

пішоходи, велосипедисти та мотоциклісти, а більшість смертей припадає на людей працездатного віку, що спричиняє значні загальнодержавні соціально-економічні втрати. Щорічно ДТП призводять до втрати до 3% ВВП, що вказує на вагомий негативний вплив на національну економіку. Дослідження [2] оцінює макроекономічний тягар травматизму внаслідок ДТП для 166 країн світу і демонструє, що травми внаслідок ДТП коштува-

тимуть світовій економіці 1,8 трильйона доларів за період 2015–2030 рр. через поєднання перенаправлення коштів: витрат на охорону здоров'я, які в іншому випадку були б використані для заощаджень і інвестицій, та втрат робочих місць через смертність та захворюваність. Ця цифра перевищує сукупний ВВП Канади (десятої за величиною економіки світу) у 2017 р. Таким чином, економічний тягар травматизму внаслідок ДТП еквівалентний щорічному податку в розмірі 0,12% від світового ВВП за цей період. Водночас більшість інфраструктурних рішень у сфері БДР зосереджені суто на технічному вдосконаленні, нехтуючи міждисциплінарним підходом, що привертає увагу до соціальних, економічних та екологічних аспектів безпеки. У цьому контексті актуальним є наукове завдання розробки системного підходу до аудиту безпеки дорожньої інфраструктури, що інтегрує цілі сталого розвитку синергічно із впровадженням інноваційних транспортних рішень. Існують заходи, що довели свою здатність знижувати ризик травматизму та смертельних випадків внаслідок ДТП, а Порядок денний сталого розвитку на період до 2030 р. встановив амбітну ціль скоротити кількість смертельних випадків та травм внаслідок ДТП на 50% до 2030 р. Цілі сталого розвитку (ЦСР) [3–4] визначають транспортну безпеку як один із ключових елементів сталого розвитку, зокрема в Україні, шляхом безпосереднього досягнення:

- ЦСР 3 «Міцне здоров'я і благополуччя» (ЦСР 3.6 «Зменшення кількості травм та смертей на дорогах»);

- ЦСР 11 «Сталий розвиток міст і громад» (ЦСР 11.2 «Забезпечення розвитку поселень і територій виключно на засадах комплексного планування та управління за участю громадськості»);

- ЦСР 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура» (ЦСР 9.1 «Розвиток якісної, надійної, сталої та доступної інфраструктури, яка базується на використанні інноваційних технологій, у тому числі екологічно чистих видів транспорту»).

Отже вирішення цієї проблеми потребує формування міждисциплінарної методології оцінювання інфраструктури, здатної комплексно забезпечити як технічну безпеку автомобільних доріг (АД), так і соціальну ефективність разом із економічною доцільністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дев'ять із десяти смертельних випадків на дорогах трапляються в країнах з низьким та середнім рівнем доходу, до яких належить і Україна, хоча

в цих країнах знаходиться лише 60% транспортних засобів світу. Відповідно до Глобального звіту ВООЗ про стан БДР за 2023 р. [5] оцінка 500 тис. км доріг з твердим покриттям, обраних у 82 країнах усіх регіонів та рівнів доходу, була проведена з використанням системи оцінювання БДР, розробленої Міжнародною програмою оцінки доріг (iRAP) [6], яка оцінює дороги від 0 до 5. Результати оцінки свідчать, що лише 21% доріг відповідають 3-зірковому рейтингу або вище стосовно пішоходів та дво- та триколісних транспортних засобів; 23% для велосипедистів; та 40% для легкових транспортних засобів. Крім того, 93 країни повідомляють про офіційні оцінки БДР в опитуванні для цього звіту, з яких майже 50 заявляють про оцінку лише 20–50% своєї національної дорожньої мережі. Бізнес-кейс iRAP для безпечних доріг надає глобальну оцінку кількості життів та серйозних травм, які можна врятувати, а також соціальні та економічні вигоди від максимізації відсотка поїздок дорогами 3-зіркового або кращого класу до 2030 р. Досягнення більш ніж 75% поїздок дорогами 3-зіркового або кращого класу до 2030 р. врятує приблизно 467 000 життів щороку та 100 мільйонів життів та серйозних травм протягом 20-річного періоду дії заходів. Цільові інвестиції в безпечні дороги всіма країнами у розмірі 0,1–0,2% ВВП на рік до 2030 р. забезпечать цей неймовірний результат із 8 доларами вигоди на кожен інвестований долар.

Однак дієві методи та засоби аудиту БДР не є такими, що широко імплементуються, за багатьох причин. Так, на основі опитування [7] 408 експертів з БДР різних країн, проаналізовано їхнє сприйняття ефективності аудиту БДР (АБДР, RSA – Road Safety Audit). Дослідження виявило, що в країнах з низьким та середнім рівнем доходу знання про аудит БДР та доступ до відповідних служб є обмеженими. Також слід звернути увагу на зміст інструкцій аудит БДР різних країн світу (у залежності від національних, економічних особливостей та стратегічних пріоритетів розвитку інфраструктури) за ключовими параметрами: вони містять визначення аудиту БДР, етапи впровадження, використання листів перевірки, вимоги до кваліфікації аудиторів та юридичні аспекти. Подібні порівняльні огляди [8] наводять значні відмінності та надають рекомендації щодо удосконалення нормативних документів.

Отже аудит БДР, зокрема в Україні, має бути побудований системно з огляду на досягнення пріоритетних ЦСР із урахуванням специфічних особливостей існуючих та перспективних

транспортних мереж. Автори дослідження [9], порівнюючи привабливість різних засобів міської логістики м. Київ з точки зору збитків від аварій, наголошують, що остаточна оцінка повинна включати такі статті зовнішніх витрат, як втрати від шкідливих викидів, від шуму та вібрації і особливо від транспортних заторів на мережі. Однак остаточний вибір міського засобу доставки вантажів повинен бути розроблений з урахуванням як соціальних, екологічних, так і прямих економічних витрат. Науковці [10] влучно відмічають, що аудит БДР в Україні ще не став загальноприйнятою практикою і має ряд проблем, таких як: 1) недостатня кількість та кваліфікація аудиторів БДР; 2) низька свідомість та зацікавленість замовників та виконавців дорожніх робіт у проведенні аудиту БДР; 3) обмеженість фінансових та технічних ресурсів для реалізації рекомендацій аудиту БДР; 4) відсутність ефективного контролю та відповідальності за виконання рекомендацій аудиту БДР.

У роботі [11] отримано висновок, що для підвищення ефективності державної політики України у сфері БДР, яка оцінюється зменшенням кількості загиблих та травм учасників дорожнього руху (ДР), повинні враховуватись і зменшення збитків, спричинених цими інцидентами. Також необхідно враховувати нові виклики та загрози, зокрема й військового характеру, під час розробки нової національної стратегії забезпечення БДР та транспортних операцій в Україні. Тому перспективні напрямки діяльності у вирішенні сучасних проблем у сфері автомобільного транспорту та у правовому полі України, що були актуальні до 2022 р., потребують доповнення низкою інших завдань, на які вплинули військові дії та їх негативні наслідки.

У багатьох країнах, зокрема в Україні, аудит дорожньої інфраструктури поки що не повною мірою інтегрований у систему стратегічного планування міського розвитку. Існуючі підходи здебільшого обмежуються технічним аналізом, без врахування соціально-економічних наслідків, екологічного впливу чи довгострокової стійкості інфраструктурних рішень. Це створює потребу в міждисциплінарному підході, який поєднає економічний, соціальний та екологічний аналізи для формування більш ефективної моделі аудиту БДР в умовах сталого розвитку міст.

Постановка завдання. Метою статті є формування концептуального підходу до аудиту БДР, який дозволяє виконати оцінку БДР з урахуванням цілей та принципів сталого розвитку для визна-

чення підстав прийняття обґрунтованих управлінських рішень з підвищення БДР.

Виклад основного матеріалу. Загальновідомо, що ДТП є серйозною соціально-економічною проблемою майже в усіх країнах світу. Для зменшення кількості постраждалих на дорогах було розроблено різноманітні заходи та програми. На міжнародному рівні ООН, Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ), міжнародні фінансові організації (насамперед Світовий банк (СБ), Європейський інвестиційний банк (ЄІБ), Міжнародний банк реконструкції та розвитку (МБРР), Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) тощо) та деякі спеціалізовані НУО (СДА (PIARC)), МАФ (IRF), ЄРБДР (ETSC), Міжнародна організація із запобігання ДТП (PRI), Центр моніторингу транспортних потоків у Південно-Східній Європі (SEETO) / Договір про створення транспортного товариства (TREATY), МЦБД (IRSC) тощо) є впливовими організаціями, які ведуть ефективну роботу над підвищенням безпеки АД у глобальному масштабі [12]. Базуючись на актуальності досягнення ЦСР 3.6 «Зменшення кількості травм та смертей на дорогах» та враховуючи наявність міжнародних маршрутів (коридорів), що проходять територією країни, питання усунення потенційних ризиків для учасників ДР мають першочергове значення. Для розгляду складу цього питання розроблено загальну схему концептуального підходу до аудиту БДР із урахуванням принципів сталого розвитку задля досягнення ЦСР (табл. 1).

В результаті досліджень було приділено увагу питанням соціального та економічного блоків. Було визначено, що до особливостей аудиту БДР слід віднести наступні положення [13]:

- дорога має бути передбачуваною за параметрами руху і зрозумілою за дорожніми умовами: таким чином має бути забезпечений необхідний обсяг інформації щодо напрямів та режимів руху автотransпортних засобів;

- забезпечення безпеки руху у темний час доби та для вразливих учасників ДР, пом'якшення наслідків ДТП у разі їх виникнення;

- зниження витрат на кожному наступному етапі технологічного проекту будівництва дороги за рахунок виявлення та усунення недоліків на попередніх етапах;

- визначення рівня БДР та розробка рекомендацій щодо підвищення безпеки на дорозі.

Після майже двох десятиліть досвіду проведення аудиту БДР (RSA) у всьому світі цю процедуру нині визнано одним з найефективніших

Структура концептуального підходу до аудиту БДР у контексті сталого розвитку

Питання аудиту БДР	Відповідність цілям сталого розвитку	Результат впровадження
СОЦІАЛЬНИЙ БЛОК		
– безпека учасників ДР; – зменшення кількості та важкості наслідків ДТП	<i>ЦСР 3 – Міцне здоров'я і благополуччя</i>	підвищення безпеки дорожнього середовища, зниження смертності та травматизму (ЦСР 3.6)
	<i>ЦСР 11 – Сталий розвиток міст і громад</i>	доступність транспорту, безпека вразливих учасників руху, зменшення соціальної напруги
	<i>ЦСР 10 – Скорочення нерівності</i>	доступ до безпечного транспорту для соціально незахищених груп (особи з інвалідністю, діти, літні люди) – покращення інклюзивності міського простору
ЕКОНОМІЧНИЙ БЛОК		
– зниження витрат від ДТП; – ефективність використання інфраструктури; – економія бюджетних коштів; – інвестиції у БДР; – запобігання втратам ВВП	<i>ЦСР 8 – Гідна праця та економічне зростання</i>	зниження втрат продуктивності, скорочення фінансових втрат від ДТП
	<i>ЦСР 9 – Промисловість, інновації та інфраструктура</i>	фінансування інноваційних рішень у транспорті, оптимізація витрат на утримання інфраструктури
	<i>ЦСР 17 – Партнерство заради сталого розвитку</i>	фінансова співпраця, міжнародні інструменти безпеки (наприклад, iRAP), зростання ефективності інвестицій у БДР, державно-приватне партнерство
ЕКОЛОГІЧНИЙ БЛОК		
– зниження шкідливих викидів; – збереження зелених зон; – адаптація до кліматичних змін; – зниження рівня шуму; – використання екологічно-чистих технологій	<i>ЦСР 13 – Пом'якшення наслідків зміни клімату</i>	зниження навантаження на довкілля, зниження викидів CO ₂ , розвиток еко транспорту
	<i>ЦСР 15 – Захист та відновлення екосистем суші</i>	сприяння кліматичній стійкості транспортної системи, зменшення впливу транспорту на зелені зони, біорізноманіття
	<i>ЦСР 12 – Відповідальне споживання та виробництво</i>	екологічно чисті матеріали для будівництва доріг, ресурсощадні рішення

Джерело: розроблено авторами

технічних засобів підвищення рівня безпеки на АД. Аудит БДР є високо результативним та економічно ефективним засобом. Значно дешевше виявляти недоліки, які впливають на БДР на етапі проектування автомобільних доріг, ніж згодом, після завершення їх будівництва. Фінансування аудиту БДР є однією з найбільш економічно ефективних інвестицій органів влади, які відповідають за сферу дорожнього господарства та управління АД [12].

Таким чином, відповідно до відомої міжнародної практики (Посібник PIARC), було визначено взаємодію етапів проведення аудиту БДР, що здійснюються послідовно на всіх стадіях життєвості АД (рис. 1): 1) планування дороги; 2) ескізне (або попереднє) проектування; 3) детальне проектування; 4) підготовка до відкриття дороги (передексплуатаційна стадія); 5) початкова стадія експлуатації, після того, як дорога певний час була в експлуатації.

Для кожного етапу проведення аудиту встановлено цілі та завдання, які потребують вирішення на підставі існуючих вхідних параметрів [13]. Докладно наведено методики визначення параметрів транспортних потоків, дорожніх умов та режимів руху, які впливають на безпеку руху на всіх стадіях функціонування АД. Розроблено класифікацію методів визначення показників БДР, що оцінюють захищеність усіх учасників ДР на різних ділянках транспортної мережі. Отримало подальший розвиток визначення параметрів пішохідного руху для проведення аудиту безпеки пішоходів.

Аудит БДР на сьогодні існує як найбільш ефективний інструмент інжинірингу не тільки для окремих елементів транспортної системи, а і для функцій їх взаємодії із урахуванням людського фактору. Такий підхід базується на принципах «безпечної системи»: на взаємодії між учасниками ДР та автодорогою, які повинні відповідати її призначенню, що може забезпечити синергіч-

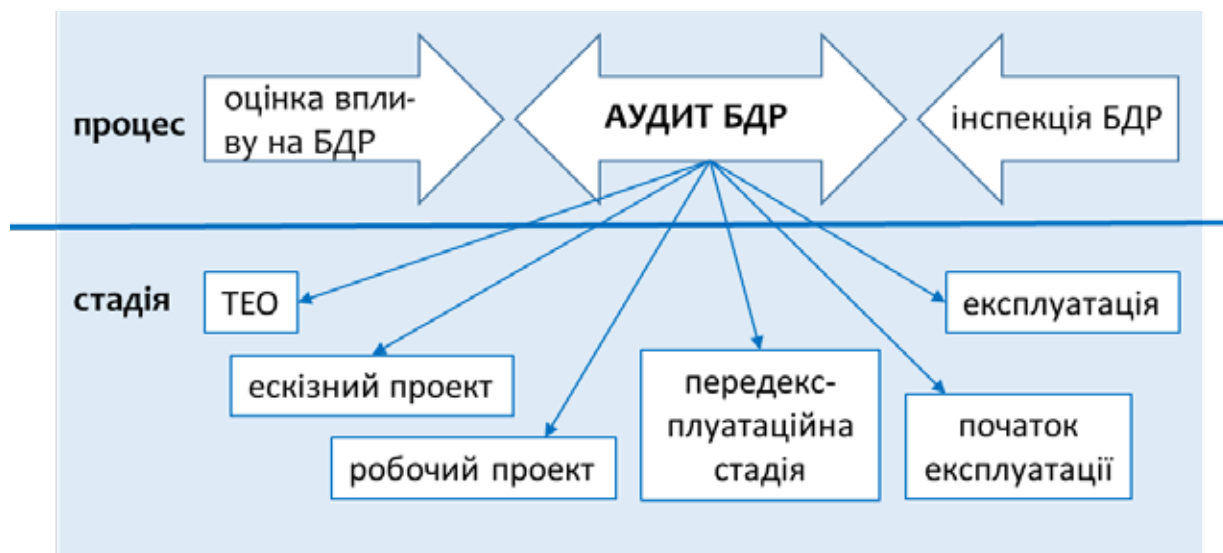


Рис. 1. Взаємодія рівнів аудиту БДР

Джерело: розроблено авторами

ний ефект досягнення ЦСР соціального, економічного та екологічного напрямків.

Відповідно до функціонального призначення, розроблено схему взаємодії комплексних заходів з підвищення БДР, серед яких ключову роль відіграє аудит БДР. До обов'язкових складових такої системи належать: оцінка впливу на безпеку ДР (ОВБДР); аудит БДР на різних стадіях проектування автодорог; програма оцінювання автодороги (ПОАД); інспекція БДР (ІнБДр); управління місцями концентрації ДТП (УМК); детальний аналіз ДТП із тяжкими наслідками (ДАДТП). Наведено результати порівняльного аналізу традиційного підходу до визначення безпеки БДР із існуючим за результатами проведення аудиту (рис. 2).

Рисунок 2 наочно свідчить, що аудит БДР за своєю сутністю є дієвим проактивним елементом, що має бути реалізований на стадії проектування доріг – задля завчасного попередження та запобігання ДТП, збереження життя, здоров'я учасників руху та сталого розвитку транспортної інфраструктури України у цілому.

Особливу увагу у дослідженнях було приділено блоку УМК (рис. 3). В процесі вибору заходів щодо ліквідації місць концентрації ДТП необхідно віддавати перевагу саме економічним рішенням. Низька вартість не завжди визначає погану якість. Такий підхід впливає на зменшення капітальних витрат і, відповідно, швидке впровадження шляхом удосконалення дорожніх умов. На підставі опису етапів і цілей аудиту розроблено методичні рекомендації щодо проведення поетапної оцінки БДР як необхідної процедури із обов'язковим формуванням аркушів контролю

аудиторами для подальшого аналізу коефіцієнтів аварійності, а також для прийняття рішень з підвищення БДР небезпечних ділянок та усунення дефектів на дорозі [14].

Так можливо ліквідувати більшу кількість місць концентрації ДТП, що призведе до зменшення ризиків виникнення ДТП. Коректне розгалуження транспортних потоків, встановлення штучних огорожень, покращення освітлення, високоякісна дорожня розмітка та застосування дорожніх знаків із високим ступенем відбиття світла – усе це є фактично типовими економними заходами, які підвищують рівень БДР на дорогах. У підсумку необхідно сформулювати обґрунтований перелік заходів для усунення виявлених недоліків на складних ділянках транспортної мережі. При цьому перевага має надаватися вискоелективним та економічно доцільним рішенням. Остаточний вибір рішення базується на аналізі вигід і витрат, головна мета якого – встановити пріоритетність впровадження заходів на місцях концентрації ДТП, що може здійснюватися двома способами: 1) вибір найбільш ефективних заходів у межах існуючого бюджету; 2) визначення обсягу фінансування, необхідного для досягнення заданого рівня підвищення безпеки БДР. У більшості випадків превалює підхід, пов'язаний із вирішенням першої задачі, оскільки обсяги бюджетів є завжди обмеженими. Тоді для вирішення задачі аналізу вигід та витрат до необхідної первинної інформації відносяться: 1) робочий перелік місць концентрації ДТП; 2) проект та кошторис запропонованих заходів підвищення БДР для означених складних ділянок транспортної мережі.

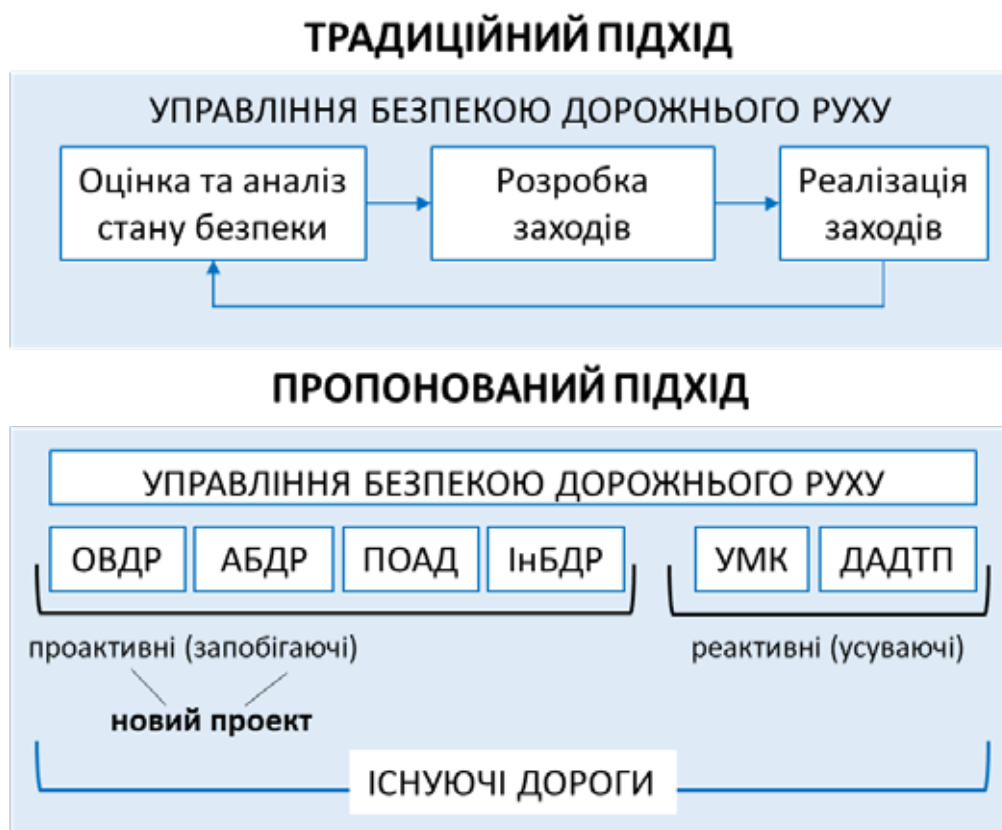


Рис. 2. Порівняльний аналіз визначення БДР за традиційним підходом та із урахуванням аудиту БДР

Джерело: розроблено авторами

До етапів процедури аналізу вигід та витрат слід віднести:

- розрахунок річних витрат на обрані заходи організації ДР;
- оцінка кількості попереджених ДТП;
- розрахунок показника рентабельності при реалізації заходів;
- визначення пріоритету заходів.

Результатом отримання переліку місць концентрації ДТП за пріоритетами є створення національної програми (НП) по їх усуненню на транспортній мережі країни [15]. В НП повинні бути встановлені середньо- та довгострокові цілі у галузі БДР. Основною метою НП має стати зменшення соціальних та економічних втрат, спричинених ДТП і травматизмом; а це передбачає:

- економічно доцільне впровадження технічних і організаційних рішень для підвищення безпеки дорожнього руху на ділянках із зафіксованими випадками тяжких ДТП;
- посилення міжвідомчої взаємодії та залучення ключових стейкхолдерів для мобілізації ресурсів і фінансування пріоритетних заходів з метою мінімізації ризиків виникнення ДТП.

Такий підхід суттєво впливає на планування економічних витрат для підвищення соціальної ефективності ДР та його безпеки [13–14].

Висновки. ДТП залишаються серйозною загрозою для соціально-економічної стабільності країн, спричиняючи значні втрати людського потенціалу та ВВП. Зниження травматизму та смертності на дорогах є пріоритетним напрямом державної політики у контексті досягнення ЦСР. Отже, аудит БДР є не лише ефективним інструментом інжинірингу та управління ризиками, а й важливою складовою реалізації принципів сталого розвитку. Він дозволяє системно виявляти критичні недоліки на всіх етапах життєвого циклу транспортних об'єктів (від проектування до експлуатації й модернізації), забезпечуючи цим превентивне зниження аварійності. Завдяки інтеграції в аудит БДР соціальних, економічних та екологічних індикаторів, його результати безпосередньо сприяють досягненню таких ЦСР, як збереження життя та здоров'я (ЦСР 3), розвиток сталої інфраструктури (ЦСР 9), безпечні міста (ЦСР 11), зменшення соціальної нерівності (ЦСР 10) та скорочення впливу на довкілля

(ЦСР 13 і 15). Таким чином, аудит БДР трансформується зі стандартної технічної процедури у стратегічний інструмент інтегрованого національного розвитку країни.

Запропонований концептуальний підхід до імплементації аудиту БДР поєднує технічні, економічні, соціальні та екологічні індикатори ефективності, що забезпечує міждисциплінарні технології до оцінки інфраструктурних рішень і формує підґрунтя для сталого розвитку транспортної системи. Інтеграція цілей сталого розвитку (ЦСР 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15 та 17) у процедуру аудиту БДР дозволяє не лише підвищити БДР, а й забез-

печити соціальну справедливість, екологічну відповідальність та економічну доцільність. В умовах України, особливо у післявоєнний період, запровадження технологій аудиту БДР є необхідним кроком для мінімізації збитків від ДТП та для забезпечення адаптивності транспортної інфраструктури до нових викликів.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку індикаторів ефективності екологічних заходів аудиту БДР у конкретних регіональних умовах, а також на формування національної програми пріоритетів з урахуванням доступного фінансування.

Список літератури:

1. Road traffic injuries. World Health Organization. URL : https://www.who.int/health-topics/road-safety#tab=tab_1 (last accessed: 15.05.2025).
2. Chen, S., Kuhn, M., Prettnner, K. & Bloom, D. E. The global macroeconomic burden of road injuries: estimates and projections for 166 countries. *The Lancet Planetary Health*, Volume 3, Issue 9, e390–e398. URL : <https://surl.lu/teyxt> (last accessed: 15.05.2025).
3. The Global Goals. URL : <https://www.globalgoals.org/> (last accessed: 21.05.2025).
4. Державна служба статистики України. 17 цілей, щоб змінити наш світ. URL : <https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/> (дата звернення: 19.05.2025).
5. Global status report on road safety 2023. Geneva: World Health Organization; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. URL : <https://surl.li/mqyejm> (last accessed: 21.05.2025).
6. iRAP Safety Insights Explorer. London: iRAP, 2021. URL : <https://irap.org/safety-insightsexplorer> (last accessed: 21.05.2025).
7. AlHamad, S., Almallah, M., Naser, M. N., Alhajyaseen, W. K. M., & de Roos, M. P. (2022). Examining the role of road safety audits worldwide: exploring road safety expert's opinions. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 30(1), 106–115. <https://doi.org/10.1080/17457300.2022.2114090> (last accessed: 20.05.2025).
8. A Comparative Review of Road Safety Audit Guidelines of Selected Countries. (2013). *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 65(3). <https://doi.org/10.11113/jt.v65.2148> (last accessed: 15.05.2025).
9. Savchenko, L., Boichenko, M. & Galkin, A. Estimation of traffic accident costs for last-mile logistics in Kyiv. *13th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. Liverpool, United Kingdom, 2020, pp. 347–351, DOI : 10.1109/DeSE51703.2020.9450777.
10. Кашканова А. А., Біліченко В. В. Проблемні питання науково-методичного забезпечення аудиту безпеки дорожнього руху. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2 (23). С. 97–108. DOI : 10.36910/automash.v2i23.1531.
11. Batorygareieva, V., Kolodyazhny, M. & Netesa, N. (2023). War As A Challenge To Road Safety: Damage To Society And The Economy Of Ukraine. *Baltic Journal of Economic Studies*. Publishing house «Baltija Publishing», Vol. 9(5). 48–56. DOI : 10.30525/2256-0742/2023-9-5-48-56.
12. Практичний посібник для аудиторів та інспекторів безпеки автомобільних доріг. World Bank Global road safety facility, Bloomberg Philanthropies, Українська асоціація аудиторів безпеки автомобільних доріг. 2022. Спеціальне видання адаптоване до умов безпеки автомобільних доріг в Україні. URL : https://www.roadsafetyfacility.org/ai_file_subscribe/file/721. (дата звернення: 10.05.2025).
13. Абрамова Л. С., Наглюк І. С., Ширін В. В., Птиця Г. Г., Капінус С. В. Аудит безпеки дорожнього руху : підручник. Під заг. ред І. С. Наглюка. Харків : ХНАДУ, 2016. 260 с.
14. Абрамова Л. С., Наглюк І. С., Ширін В. В., Птиця Г. Г., Капінус С. В., Левченко О. С., Харченко Т. В. Практикум з проведення аудиту безпеки дорожнього руху : навч. посіб. Харків : ХНАДУ. 2019. 140 с.
15. Деділова Т. В., Пушкарьова Н. А., Кабанець М. С. Аналіз взаємодії України та ЄС за проектом TRASECA у сфері безпеки дорожнього руху. *Глобальні та національні проблеми економіки*. Випуск 13. 2016. С. 62–67.

Abramova L.S., Abramova O.S., Ptytsia H.H. INTEGRATION OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS INTO ROAD SAFETY MANAGEMENT

This article proposes a conceptual approach to road safety audit (RSA) integrated with the principles of sustainable development. Against the background of global road traffic challenges – including persistently high mortality rates, rising urban mobility demand, and climate vulnerability – the authors argue that RSA must evolve from a narrowly technical procedure to a multidisciplinary instrument of strategic planning and risk management. The proposed framework includes three interconnected evaluation blocks: economic, social, and environmental, each supported by measurable performance indicators. These indicators enable policymakers and practitioners to assess infrastructure projects at all stages – planning, implementation, and modernization – through the lens of financial viability, social inclusion, and ecological sustainability. Special attention is given to the alignment of RSA practices with the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 13 (Climate Action), and others. The article outlines how RSA implementation contributes not only to reducing accident-related human and economic losses, but also to optimizing infrastructure investments and enhancing long-term environmental resilience. In the context of Ukraine's post-war recovery and the urgent need to rebuild and modernize critical transport systems, the integration of RSA into national transport and infrastructure policy offers practical tools for achieving road safety, transport efficiency, and sustainable urban development. The study reinforces the role of RSA as a governance mechanism for prioritizing interventions, improving accountability, and facilitating cross-sector collaboration in pursuit of national and global development goals.

Key words: sustainable development, Sustainable Development Goals (SDGs), audit, road safety, safety effectiveness, transport infrastructure.

Дата надходження статті: 21.07.2025

Дата прийняття статті: 31.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Вікович І.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

Обшта А.Ф.

Національний університет «Львівська політехніка»

Приходько В.Е.

Національний університет «Львівська політехніка»

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ОДНОЛАНКОВИМИ АВТОПОЇЗДАМИ В ТРАНСПОРТНИХ КОРИДОРАХ США

У статті розглядається задача оптимізації економічної ефективності міжнародних вантажних перевезень одноланковими автопоїздами як багатокритеріальна модель. Її ціль – мінімізувати витрати й одночасно максимізувати продуктивність, з урахуванням обмежень, що впливають із нормативних, інфраструктурних та екологічних вимог. Особливу увагу приділено умовам перевезень на території США, де маршрути ускладнені платними дорогами, висотними обмеженнями мостів і тунелів, погодними ризиками та варіативною пропускною здатністю. У таких умовах ефективне планування потребує врахування широкого кола факторів.

Міжнародні вантажні перевезення є важливою складовою ефективності логістичних систем, де одноланкові автопоїзди відіграють ключову роль завдяки своїй вантажопідйомності та маневреності. Однак економічна ефективність цих перевезень залежить не лише від витрат і часу доставки, а й від технічного стану автопоїзда, енергоспоживання, стану доріг, екологічних та нормативних вимог. Особливо складними є умови перевезень у США, де враховуються платні дороги, обмеження по висоті, змінна пропускна спроможність і погодні ризики, що вимагає комплексного підходу до планування маршрутів та оптимізації параметрів перевезень. Відсутність цілісної багатокритеріальної моделі, яка б об'єднувала техніко-експлуатаційні, енергетичні, транспортні, нормативні та інфраструктурні фактори, є суттєвою проблемою. Впровадження інтегрального підходу, що базується на аналізі роботи ключових механізмів автопоїзда, є необхідним для підвищення ефективності планування та стійкості міжнародних логістичних систем.

Запропоновано методологію визначення оптимального значення економічної ефективності, що передбачає обчислення найкращих значень критеріїв з урахуванням інтегрального показника ефективності та особливостей маршруту. Модель має практичне значення для планування міжнародних перевезень і підвищення стійкості логістичних рішень у складному середовищі транспортних систем США.

Ключові слова: економічна ефективність, міжнародні вантажні перевезення, одноланковий автопоїзд, маршрут, інтегральний показник ефективності, оптимізація.

Постановка проблеми. Міжнародні вантажні перевезення є важливою ланкою логістичних систем, де дизельні автопоїзди відіграють ключову роль завдяки своїй вантажності та маневреності. Однак економічна ефективність цих перевезень залежить не лише від витрат і часу доставки, а й від технічного стану автопоїзда, енергоспоживання, стану доріг, екологічних та нормативних вимог. Особливо складними є умови перевезень у США, де враховуються платні дороги, обмеження по

висоті, змінна пропускна спроможність і погодні ризики, що вимагає комплексного підходу до планування маршрутів та оптимізації параметрів перевезень. Відомі багатокритеріальні моделі враховують лише незначну кількість з великої множини техніко-експлуатаційних, енергетичних, транспортних, нормативних та інфраструктурних факторів, що залишає актуальною проблему достовірного визначення показників економічної ефективності перевезень вантажів автопоїз-

дами. Впровадження інтегрального підходу, що базується на аналізі роботи ключових механізмів автопоїзда, є необхідним для підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень. Запропонована методологія має практичне значення для планування міжнародних перевезень і підвищення ефективності логістичних рішень для транспортних систем США.

Економічна ефективність міжнародних вантажних перевезень автопоїздами є ключовим фактором конкурентоспроможності логістичних систем і залежить не тільки від витрат і часу доставки, а й від технічного стану транспортного засобу, енергоспоживання, стану дорожньої інфраструктури, екологічних вимог і нормативних обмежень. Особливо складними є умови перевезень у США, де інфраструктура включає платні дороги, обмеження по висоті, змінну пропускну здатність і погодні ризики, що потребує комплексного підходу до планування маршрутів та вибору оптимальних параметрів перевезень.

Проблема полягає в удосконаленні комплексної багатокритеріальної моделі, яка б оптимізувала витрати і продуктивність вантажних перевезень з урахуванням енергетичних, транспортних та дорожніх характеристик автопоїзда, нормативно-правових вимог і особливостей інфраструктури. Важливо впровадити інтегральний підхід до оцінювання техніко-експлуатаційної ефективності транспортного засобу, базований на аналізі функціонування 14 ключових механізмів автопоїзда у реальних умовах експлуатації [1, с. 134–142]. Такий підхід створить підґрунтя для раціонального планування міжнародних маршрутів і підвищення стійкості логістичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Економічна ефективність вантажних перевезень одноланковими автопоїздами – це інтегральний показник, що враховує співвідношення результату та витрат, а також технічні, організаційні й економічні чинники. Її оцінюють за собівартістю, рентабельністю, продуктивністю та витратами на інфраструктуру [2, с. 121]. Ефективність визначає доцільність використання транспортних засобів у конкретних умовах [3, с. 63–64] і оцінюється за фінансовими та нефінансовими показниками.

У різних країнах при визначенні економічної ефективності основна увага зосереджується на дещо відмінних критеріях: у США – операційна ефективність, витрати пального, продуктивність, вплив на довкілля, методологія DEA і «rebound effect» [4, с. 64–69]. Польські дослідження орієнтовані на продуктивність автопарку, прибут-

ковість, витрати на транспортну роботу, застосування DEA [5, с. 194–195]. Німеччина приділяє увагу інфраструктурі, інноваціям, енергоефективності й екології [6, с. 8–9].

У ЄС і Великій Британії виокремлюють витрати на одиницю роботи, енергоефективність, викиди CO₂, шум і цифрові рішення. В Україні основні критерії – мінімізація витрат, підвищення продуктивності, безпека, якість і сталий розвиток [7, с. 20–21].

Попри широкий спектр підходів, бракує комплексної багатокритеріальної моделі, яка враховує технічні, інфраструктурні й нормативні особливості, зокрема для маршрутів у США. Ця прогалина визначає актуальність подальших досліджень.

Сучасні багатокритеріальні методи: DEA (Data Envelopment Analysis) – безпараметричний метод оцінки ефективності з урахуванням кількох показників. Нечітка логіка (Fuzzy Logic) – для аналізу нечітких і непевних даних. Моделі оптимізації та симуляції – прогнозування результатів за різних сценаріїв. Інтегровані системи оцінки – поєднання фінансових, операційних та екологічних показників. Важливими джерелами є праці [8, 9, 10], що розвивають сучасні підходи до оцінки ефективності міжнародних вантажних перевезень. У [8, с. 70–80] запропоновано індекс GDP/GHG, що об'єднує економічні та екологічні цілі, підкреслюючи важливість сталого розвитку в транспорті. Проте залишається питання точності оцінки цих показників у реальних умовах. Джерело [9, с. 40–60] розглядає багатокритеріальні методи (MCDM) для оцінки маршрутів з урахуванням економічних, часових і екологічних факторів. Новизна – інтеграція сучасних алгоритмів оптимізації, проте точність моделей у складних системах залишається проблемою. Класична праця [10, с. 500–509] формалізувала застосування DEA для оцінки технічної, економічної та операційної ефективності автотранспорту. DEA враховує багато параметрів, але потребує якісних даних і складної інтерпретації. Інтернет-джерела HSE Network (2025) та NetworkON (2025) описують сучасне програмне забезпечення з використанням штучного інтелекту та мультикритеріального аналізу для оптимізації маршрутів, що дозволяє оперативно адаптуватися до змін трафіку та витрат. Відкриті проблеми включають: якість і репрезентативність вхідних даних для моделей (DEA, MCDM); інтеграцію екологічних і економічних критеріїв у єдину модель; урахування змінних зовнішніх факторів (інфраструктура, регіональні особливості); інтерпретацію

результатів і впровадження у практику; стандартизацію оцінок у різних регіонах. Методи MCDM, такі як АНР, TOPSIS, і інтегровані системи оцінки, широко застосовуються для багатокритеріальної оцінки економічної ефективності автопоїздів [5, с. 193–201; 9, с. 40–60; 11, с. 45–56]. Вони дозволяють поєднувати фінансові, екологічні та операційні показники, підтримують прийняття рішень в умовах складних і суперечливих факторів. У працях [12–15] описано застосування багатокритеріальних моделей у США та Канаді з урахуванням інтенсивності руху, ремонту, інфраструктурних обмежень і складних маршрутних умов. Новизна полягає у комплексному підході до вибору партнерів і оптимізації маршрутів із використанням GIS та даних трафіку.

Постановка завдання. Дослідження спрямоване на формування та розроблення методології розрахунку інтегрального показника економічної ефективності міжнародних перевезень на основі *методу аналітичної ієрархії* Т. Сааті [16] із урахуванням інтегрального показника енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності автопоїзда як засобу перевезення та специфіки маршрутів у США. Вхідними даними є результати, отримані на основі використання реальних даних маршруту вантажних перевезень одноланковим автопоїздом Freightliner Cascadia 2023 з Чикаго, США, до Далласа, TX (відстань понад 1000 км), з урахуванням часу на завантаження, поїздки, обов'язкові зупинки для відпочинку, витрат на паливо, оплату водієві, платних доріг, страхування, амортизації та значення інтегрального показника енергетичної, транспортної та економічної ефективності автопоїзда. Останній розраховано на основі вдосконаленої методології визначення інтегрального показника ефективності системи «дизельний двигун – трансмісія» автопоїзда [17].

Виклад основного матеріалу. Формально, задача полягає в розробленні методології, яка дозволяє обчислити екстремальні значення функцій

$$f_i(\bar{x}), \bar{x} \in S, i = \overline{1,7}, \quad (1)$$

де:

- $f_1(\bar{x})$ – собівартість перевезень;
- $f_2(\bar{x})$ – час міжнародного рейсу;
- $f_3(\bar{x})$ – рентабельність перевезень;
- $f_4(\bar{x})$ – продуктивність автопоїзда;
- $f_5(\bar{x})$ – коефіцієнт використання вантажності;
- $f_6(\bar{x})$ – величина платні за пошкодження дороги;

$$f_7(\bar{x}) = E.$$

Кожна функція $f_i(\bar{x})$ – це окремий критерій, який відповідає складовій економічної ефективності. Отже, необхідно знайти

$$\left\{ \min_{\bar{x} \in S} f_1(\bar{x}), \min_{\bar{x} \in S} f_2(\bar{x}), \min_{\bar{x} \in S} f_6(\bar{x}) \right\}, \quad (2)$$

та

$$\left\{ \max_{\bar{x} \in S} f_3(\bar{x}), \max_{\bar{x} \in S} f_4(\bar{x}), \max_{\bar{x} \in S} f_5(\bar{x}), \max_{\bar{x} \in S} f_7(\bar{x}) \right\} \quad (3)$$

вектору цільових функцій

$$(f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x}), f_4(\bar{x}), f_5(\bar{x}), f_6(\bar{x}), f_7(\bar{x})). \quad (4)$$

Область допустимих аргументів $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in S$, це вектори $\bar{x}$, кожна компонента яких належить до множини параметрів, які визначають технічні, експлуатаційні характеристики засобів перевезення вантажів та ділянок маршрутів, законодавчі, нормативні, регуляторні та логістичні обмеження $(A), (B), (C), (D)$, де:

(A) Технічна справність і відповідність розмірам/вазі/екології (49 CFR, FHWA, EPA);

(B) Дозволений маршрут, дотримання графіка руху, HOS, National Network (STAA, 49 CFR Part 658);

(C) Виконання вимог FMCSA, реєстрації, платні податків, ліцензування CDL;

(D) Митні та екологічні вимоги (CBP, EPA).

Узагальнені формули для розрахунків критеріїв економічної ефективності одноланкового автопоїзда типу Freightliner Cascadia 2023 або Volvo FM.

1. Собівартість одного тонно-кілометра ($f_1(\bar{x}) = C_{tkm}$):

$$f_1(\bar{x}) = C_{tkm} = \frac{C_{fixed} + C_{var} \times T}{P \times T}, \quad (5)$$

де:

C_{fixed} – постійні витрати (амортизація, заробітна плата водія, страхування тощо) за рейс або за годину.

C_{var} – змінні витрати (паливо, ремонт, масильні матеріали, шини) за годину або за рейс.

T – загальний час виконання рейсу, год.;

$P \times T$ – загальний обсяг перевезень за рейс (тонно-кілометри).

2. Час виконання перевезення ($f_2(\bar{x}) = T$):

$$f_2(\bar{x}) = T = L / V + T_d, \quad (6)$$

де:

L – довжина маршруту, км;

T_d – час простоїв (завантаження/розвантаження), год.

3. Рентабельність перевезень $f_3(\bar{x})$:

$$f_3(\bar{x}) = (R_{income} - f_1(\bar{x}) \cdot V_{carry} \cdot d) / (f_1(\bar{x}) \cdot V_{carry} \cdot d), \quad (7)$$

де:

R_{income} – дохід від перевезення, залежить від тарифів, відстані і вантажу;

$f_1(\bar{x}) \cdot V_{carry} \cdot d$ – загальні витрати на рейс (собівартість перевезень помножена на фактичний вантаж і довжину рейсу);

Законодавчі та митні обмеження впливають на тарифи і умови (податки, збори).

4. Продуктивність автопоїзда ($f_4(\bar{x}) = P$):

$$f_4(\bar{x}) = P = V \times M_{load} \times \eta_{load}, \quad (8)$$

де:

V – середня швидкість руху автопоїзда, км/год (для Volvo FM, залежно від дорожніх умов, зазвичай 70–85 км/год);

M_{load} – максимальна вантажопідйомність автопоїзда, т (для Volvo FM з причепом – до 40 т і більше, залежно від модифікації);

η_{load} – коефіцієнт використання вантажопідйомності (0–1);

5. Коефіцієнт використання вантажопідйомності $f_5(\bar{x})$:

$$f_5(\bar{x}) = U_{load} = (C_{fact} / C_{load}) \leq 1, \quad (9)$$

де:

C_{fact} – фактичний вантаж – маса вантажу, який реально перевозиться (тонн);

C_{load} – максимально допустима вантажопідйомність автопоїзда (тонн);

U_{load} – коефіцієнт, який не може перевищувати 1 згідно з конструктивними обмеженнями;

обмеження N_{gv} (нормативи габаритно-вагові) регламентують максимальну вантажопідйомність і вагу автопоїзда.

Обмеженнями є конструктивна вантажопідйомність і нормативи щодо ваги та габаритів за N_{gv} .

6. Витрати на відшкодування збитків дорожньому покриттю $f_6(\bar{x})$:

$$f_6(\bar{x}) = k_{road} \cdot \sum_{i=1}^{n_{ax}} \left(\frac{W_i}{W_{max,i}} \right)^4 \cdot d_i, \quad (10)$$

W_i – навантаження на i -ту вісь (тонн);

$W_{max,i}$ – нормативне максимальне навантаження на вісь (тонн);

d_i – довжина ділянки маршруту з таким обмеженням (км);

k_{road} – коефіцієнт вартості ремонту/штрафів за пошкодження (грн/км).

7. Інтегральний показник E енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності Freightliner Cascadia 2023, який розраховується за формулою:

$$f_7(\bar{x}) = E, \text{ де:}$$

$$\begin{aligned} E = & 0.178322 \cdot \frac{T}{m} + 0.073298 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - 0.031179 \cdot \alpha + \\ & + 0.178322 \cdot \eta_{tr} - 0.085879 \cdot L_{tr} + \\ & + 0.12624 \cdot P_v - 0.05786 \cdot m_k + 0.04471 \cdot J_p - \\ & - 0.02367 \cdot f + 0.01052 \cdot R_t + \\ & + 0.04655 \cdot K_{ss} + 0.03724 \cdot H_{st} + \\ & + 0.02926 \cdot D_k + 0.01995 \cdot C_a, \end{aligned} \quad (11)$$

де: T – крутний момент двигуна (Н·м); m – маса двигуна (кг); I – момент інерції двигуна (кг·м²); ω – кутова швидкість двигуна (рад/с); α – кутове пришвидження двигуна (рад/с²); η – коефіцієнт корисної дії двигуна (безрозмірний); η_{tr} – коефіцієнт корисної дії трансмісії (безрозмірний); L_{tr} – сумарні втрати потужності в трансмісії (Вт або безрозмірна величина, що відображає відносні втрати), P_v – вантажність (макс. маса вантажу); m_k – маса порожнього кузова; J_p – жорсткість рами; f – коефіцієнт опору коченню; R_t – ресурс шини (англ.: tyre); K_{ss} – жорсткість підвіски (англ.: stiffness of the suspension); H_{st} – хід підвіски (англ.: suspension travel); D_k – діаметр колеса; C_a – коефіцієнт зчеплення (англ.: adhesion coefficient).

При обчисленні інтегрального показника кожен параметр нормалізований до безрозмірного вигляду. За основу для обчислення інтегрального показника економічної ефективності використані дані реального перевезення за маршрутом Чикаго (IL) → Даллас (TX):

- Відстань: $1,000 \text{ миль} \times 1.609 = 1,609 \text{ км}$;
- Час у дорозі: $\sim 15 \text{ год.}$;
- Зупинка: *Speedco (Little Rock, AR)*;
- Пальне: $120 \text{ галонів} \times \$3.549 = \$425.88 \rightarrow \$17,386$;
- Оплата водію: $1,000 \times \$0.62 = \$620 \rightarrow \$25,296$;
- 1 миля = 1.609 км;
- \$1 = 40.80 грн;
- \$0.62 = ставка платні за кожен подолану милю (25,30 грн), тобто = 25.30 грн за милю = $25.30 \text{ грн} \div 1.60934 \approx 15.72 \text{ грн за 1 км}$.

Розрахунок витрат на IFTA та платні дороги (toll roads):

- IFTA (International Fuel Tax Agreement):
 - о Приблизно \$0.04 – \$0.06 на милю, залежно від штатів, для розрахунку беремо \$0.05/милі.

Таблиця 1

Підсумкова таблиця

Маршрут	Дохід (\$)	Дохід(€)	Витрати: Пальне + Водій	Заг. витрати (\$)	Прибуток (\$)
Чикаго → Даллас	2,600	106,080.00	425.88 + 620	1,045.88	1,554.12

Таблиця 2

Таблиця з урахуванням IFTA та платних доріг (курс \$1 = €40.80)

Маршрут	Дохід (€)	Пальне (€)	Водій (€)	IFTA (€)	Tolls (€)	Витрати загалом (€)	Прибуток (€)
Чикаго → Даллас	€106,080	€17,377	€25,296	€2,040	€2,856	€47,569	€58,511

• Платні дороги (toll roads):
о Вартість залежить від маршруту, беремо середні реальні суми за конкретними напрямками.

Отже, остаточно: подано детально розрахований маршрут вантажних перевезень у США з Чикаго до Далласу, TX (відстань понад 1000 км), з урахуванням часу на завантаження, поїздки, обов'язкові зупинки для відпочинку, витрати на пальне та оплату водієві, платних доріг, страхівки, амортизації автопоїзда.

Висновки. 1. Метод АНР (Analytic Hierarchy Process) Т. Сааті продемонстрував високу ефективність у розв'язанні багатокритеріальної задачі визначення економічної ефективності міжнародних вантажних перевезень автопоїздами. Використання інтегрального індексу, який об'єднує енергетичну, транспортну та дорожню ефективність, дає змогу отримати комплексну оцінку, що враховує різнопланові параметри техніко-експлуатаційних характеристик автопоїзда та особливостей маршрутів.

2. Результати аналізу підтверджують коректність розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації: значення коефіцієнта узгодженості (CR) становить приблизно $-0,013$, що значно нижче допустимого порогу $0,10$. Це свідчить про високу внутрішню узгодженість оцінок і обґрунтованість прийнятих рішень.

3. Запропонована методологія на основі схеми Т. Сааті дає змогу враховувати велику кількість критеріїв різної природи – економічних, технічних, екологічних та експлуатаційних, що робить

її універсальним інструментом для оптимізації параметрів вантажних перевезень.

4. Особливості експлуатації автопоїздів і логістичних маршрутів у складних умовах США, з платними дорогами, інфраструктурними обмеженнями і погодними ризиками, вимагають розширення критеріїв оцінки економічної ефективності, що підкреслює потребу в подальших дослідженнях. Подальші дослідження інтегральних показників ефективності перевезень та оптимізації показників економічної ефективності ми плануємо виконувати, взявши за основу працю [21] та статистичні дані перевезень вантажів автопоїздами на великих підприємствах (понад 500 автопоїздів).

5. Розроблена модель може бути використана для управління міжнародними вантажними перевезеннями, зокрема у транспортних коридорах Україна – ЄС, сприяючи підвищенню ефективності, зниженню витрат і підвищенню екологічної безпеки.

6. Задача, розглянута в цьому дослідженні має: 7 цільових функцій; як мінімізовані, так і максимізовані критерії; комплексні обмеження (технічні, нормативні, екологічні). Тож у подальших дослідженнях доцільно буде застосувати комбінований підхід – скаляризацію через ваги та метод ідеальної точки, агрегаційно-ітеративні методи розв'язування нелінійних операторних рівнянь та генетичні алгоритми або еволюційний багатокритеріальний алгоритм (наприклад, NSGA-II).

Список літератури:

1. Хабутдінов Р. А., Хабутдінов А. Р. Концептуальна схема структурно-параметричної організації транспортної системи і технологічна ресурсосінергія в ній // Вісник Національного транспортного університету. 2008. № 17. С 134–142.
2. Лозова Г.М., Клименко В.В., Джерж Ю.А., Єрошенко О.Р. Економічні аспекти організації доставки негабаритних вантажів транспортними підприємствами України // Економічний вісник ДДХТУ. 2024. № 2. С. 115–124.
3. Строкович В.Ф., Шапаренко Н.В. Аналіз ефективності логістичної діяльності у транспорті. Харків: Харківський національний економічний університет, 2018. С. 60–67.

4. Patwary A. Latif. Efficiency Studies of the US Transportation Sector. University of Tennessee, Knoxville, 2020. 124 с.
5. Baran J. The efficiency of the road transport sector in Poland and other member states of the European Union // *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach. Ser. Administracja i Zarządzanie*. 2014. № 103. С. 193–201.
6. Freight Transport and Logistics Masterplan / Federal Ministry of Transport, Building and Urban Affairs (BMVBS). Berlin: BMVBS, 2008. 77 с.
7. Критерії економічної ефективності своєчасної доставки вантажів автомобільним транспортом // *Universum: економічні науки*. 2022. № 7(100). С. 19–24.
8. Giuliano G., Kang S., Hegde S. Assessment of Freight System Efficiency Measure: GDP/GHG. California Department of Transportation, 2021. 150 с. URL: <https://surl.li/vbiuxk>
9. Reinberg S., Torrado López E. Multi-Criteria Decision Making for International Freight Transportation. Uppsala University, 2024. 120 с. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1874953/FULLTEXT01.pdf>
10. Seiford L.M., Thrall R.M. Components of efficiency evaluation in data envelopment analysis // *European Journal of Operational Research*. 1994. Vol. 80, No. 3. P. 500–509. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179400131U>
11. Гаянець Ю.М. Економічне обґрунтування міжнародних перевезень вантажів: магістерська дисертація. Київ, Київський політехнічний інститут, 2019. 90 с.
12. Ergin V., Alkan M. Application of Multi-Criteria Decision Making in Freight Forwarder Selection. 2023. 25 с.
13. Kengpol A., Tuominen M. Development of Freight Transportation Methods with MCDM Approaches. 2014. 17 с.
14. Federal Highway Administration. Freight Logistics Optimization Works (FLOW). 2022. 40 с. URL: <https://www.bts.gov/flow>
15. Taherdoost H., Madanchian S. Multi-criteria decision-making methods in transportation: A comprehensive review. 2023. 24 с.
16. Saaty T. L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York : McGraw-Hill International Book Co., 1980. 287 p.
17. Приходько В.Е. Оцінювання енергоефективності сучасних автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень/Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2025.– № 1(24).– С. 355–366.
18. Aggregation-iterative methods for solving differential and integral equations: a monograph/A.F. Obshta – Lviv: RASTR-7, 2024, 198 p.
19. Corne D. W., Lones M. A. Evolutionary algorithms // *Evolutionary Learning: Advances in Theories and Algorithms*. – Springer, 2018. – 376 с. 20. Liu X., Peng X., Gu M. Logistics Distribution Route Optimization Based on Genetic Algorithm // *Computational Intelligence and Neuroscience*. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 1271488. – 9 p.
21. Patwary, A. Latif, «Efficiency Studies of the US Transportation Sector. « Master's Thesis, University of Tennessee, 2020. URL: https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/6269.

Vikovich I.A., Obshta A.F., Prykhodko V.E. ECONOMIC EFFICIENCY OF FREIGHT TRANSPORTATION BY SINGLE-TRACK TRUCKS IN US TRANSPORT CORRIDORS

The article addresses the problem of optimizing the economic efficiency of international freight transportation by single-link road trains as a multi-criteria model. Its objective is to minimize costs while simultaneously maximizing performance, considering the constraints arising from regulatory, infrastructural, and environmental requirements. Particular attention is paid to transportation conditions in the United States, where routes are complicated by toll roads, height restrictions of bridges and tunnels, weather-related risks, and variable throughput capacity. Under such conditions, effective planning requires consideration of a wide range of factors.

International freight transportation is an essential component of the efficiency of logistics systems, where single-link road trains play a key role due to their load capacity and maneuverability. However, the economic efficiency of these operations depends not only on transportation costs and delivery time but also on the technical condition of the road train, energy consumption, road conditions, environmental regulations, and compliance requirements. Transportation in the United States is particularly challenging, as toll roads, height restrictions, variable throughput capacity, and weather-related risks must all be accounted for. This necessitates a comprehensive approach to route planning and optimization of transportation parameters.

The lack of an integrated multi-criteria model that combines technical-operational, energy, transport, regulatory, and infrastructural factors represents a significant problem. Implementing an integral approach

based on the analysis of the performance of key mechanisms of the road train is essential for improving planning efficiency and the resilience of international logistics systems.

A methodology is proposed for determining the optimal value of economic efficiency, which involves calculating the best values of the criteria while considering the integral efficiency index and specific route characteristics. The model has practical significance for planning international transportation and enhancing the sustainability of logistics solutions in the complex environment of U.S. transport systems.

Key words: *economic efficiency, international freight transportation, single-link road train, route, integral efficiency index, optimization.*

Дата надходження статті: 29.07.2025

Дата прийняття статті: 02.09.2025

Опубліковано: 27.10.2025

УДК 656.13
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/37>

Галкін А.С.

Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

Самчук Г.О.

Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

Лифенко С.Е.

Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

Скрипін В.С.

Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

ПРОСТОРОВО-МЕРЕЖЕВИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ПАСАЖИРІВ НА ЗУПИНОЧНИХ ПУНКТАХ

У статті запропоновано просторово-мережевий підхід до кількісної оцінки безпеки пасажирів перед пошкодою – на зупинках громадського транспорту, де у випадку повітряної тривоги «вікно попередження» вимірюється хвилинами. Вихідна постановка проблеми полягає у нормативно-операційній прогалині: на відміну від будівель і підземних станцій із формалізованими вимогами безпеки, зупинки зазвичай розглядаються як елементи благоустрою без гарантованої наявності поблизу захисних споруд. Мета дослідження – інтегрувати логіку цивільного захисту в транспортне планування та запропонувати метрику, що безпосередньо характеризує захищеність пасажирів на зупиночних пунктах. Ми побудували повторюваний аналіз на відкритих даних OSM, GTFS (2019/2024) та міському списку 1 212 укриттів. Для 348 транспортно-аналітичних зон Харкова обчислено Індекс захищеності пасажирів з урахуванням відстані до укриття (ІЗПР) як відношення кількості укриттів, досяжних у межах коротких пішохідних ізохрон від зупинок, до кількості зупинок у зоні. Ізохрони формувалися у VISUM на основі пішохідного графа, подальші етапи з агрегації та картографування виконувалися у QGIS/PostGIS. Порівняльний аналіз двох часових зрізів показав істотне підвищення середнього ІЗПР у місті (орієнтовно з 0,18 до 0,57) і зниження частки зон із нульовою захищеністю (з 63 % до 29 %), що відображає впровадження та інвентаризацію укриттів поблизу зупинок. Водночас зберігається виразний центр-периферійний градієнт: формується широкий пояс мінімальної захищеності (0–1) довкола центру, тоді як периферійні та промислові кластери лишаються «пустелями безпеки». Інтерпретація класів ІЗПР дає змогу ранжувати транспортноаналітичні зони (TAZ) за наступними напрямими втручань і дій: встановлення модульних зупинок-укриттів, нарощування місткості та покращення пішохідних підходів, корекція розміщення зупинок. Методика масштабована на інші міста/сценарії (воєнні, техногенні, терористичні), а сама метрика може стати новим ключевим показником ефективності (KPI) у Sustainable Urban Mobility Plan (SUMP) та програмах безпеки руху. Обмеження дослідження (номінальні координати та паспортна місткість укриттів, обмежене урахування бар'єрів доступності й поведінкових аспектів) окреслюють подальші кроки: ємнісно-чутливі розрахунки з урахуванням черг, диференціація за групами користувачів, інтеграція з «цифровим двійником» міста для оперативного перерахунку ризику. Отримані результати закривають критичну прогалину між транспортною доступністю та цивільним захистом і створюють практичну основу для адресної політики вирівнювання пасажирського ризику у просторі міста.

Ключові слова: Індекс захищеності пасажирів (ІЗПР), безпека громадського транспорту, зупинки-укриття, пішохідні ізохрони, транспортно-аналітичні зони (TAZ), доступність укриттів, цивільний захист, резильєнтність міської мобільності.

Постановка проблеми. Сучасні міста зазнають зростання ризиків, пов'язаних із воєнними діями, терористичними загрозами та техногенними інцидентами. У цих умовах зупинки громадського транспорту, – місця концентрації пасажирів у «передпосадковій» фазі, – перетворюються на критичні точки вразливості. На відміну від будівель і підземних станцій, для яких існують установлені норми безпеки, зупинки зазвичай регулюються як елементи благоустрою, без обов'язкових вимог щодо захисних споруд поблизу. Внаслідок цього виникає нормативно-операційна «сіра зона», коли відповідальність і засоби захисту пасажирів до моменту посадки залишаються не визначеними. Додатково проблему загострюють часові обмеження: у разі повітряної тривоги «вікно попередження» вимірюється хвилинами, а отже реальна безпека залежить від миттєвої пішохідної досяжності найближчого укриття від конкретної зупинки та від топології пішохідної мережі.

Наукове завдання полягає у формуванні відтворюваного просторово-мережевого підходу, що кількісно оцінює захищеність пасажирів саме на зупинках. Недостатність спеціалізованих метрик, що прямо відбивають ймовірність та множинність «безпечних варіантів» для пасажирів в межах кількох хвилин ходи, обмежує можливості порівняння районів міста, ранжування пріоритетів і валідації рішень у динаміці.

Практичне завдання тісно пов'язане з міським плануванням і управлінням ризиками. Органам місцевого самоврядування, перевізникам та службам цивільного захисту необхідні інструменти, що дозволяють: оперативно виявляти «просторові пустелі безпеки» в мережі зупиночних пунктів; обґрунтовувати розміщення додаткових укриттів (зокрема модульних зупинок-укриттів) і підвищення місткості наявних споруд; коригувати розташування зупинок і пішохідні підходи; інтегрувати алгоритми оповіщення з маршрутизацією пасажирів до найближчих безпечних точок; формувати стандарти мінімально допустимої захищеності у Sustainable Urban Mobility Plan (SUMP) та інших політиках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження безпеки пасажирів під час очікування громадського транспорту лежить на перетині двох масивних наукових традицій – планування транспортних систем та цивільного захисту. У межах другої традиції домінують моделі розміщення укриттів і планування евакуації, що використовують оптимізаційні постановки, ГІС-аналіз і методи багатокритеріальної оцінки. Показовими

є роботи, у яких поєднують дизайн мережі з розміщенням захисних споруд і маршрутизацією, щоб одночасно мінімізувати витрати та час евакуації [1–3]. Окремий напрям становлять дослідження з урахуванням часової мінливості попиту та невизначеностей у транспортному середовищі – від змінного попиту [4] і поведінкових сценаріїв [5; 6] до землетрусів [3] і масштабування доступності [6]. Новіші праці пропонують удосконалені підходи до вимірювання просторової доступності укриттів (Ga2SFCA та його модифікації), що підкреслюють диспропорції між районами та оптимізують радіуси обслуговування [7], а також огляди методів вибору місць для укриттів у різних типах небезпек [8], робастні оптимізаційні моделі для сейсмічно небезпечних територій [9] та імітаційні моделі, які враховують поведінку мешканців і пропускну спроможність укриттів [10]. У сукупності ці підходи дають зрілий інструментарій для оцінки місткості, розміщення та призначення укриттів при масовій евакуації, але здебільшого виходять з «домогосподарського» розподілу населення та не розглядають ризики людей, що перебувають у дорозі або очікують транспорт.

Паралельно розвивається література з доступності та безпеки зупинок громадського транспорту. Тут ключовими є праці про сприйняту безпеку пасажирів і чинники злочинності/комfortу на зупинках [11], вплив конструкції зупинки на кількість та тяжкість ДТП [12], індекси пішохідної безпеки навколо зупинок [13] і просторові моделі аварійності біля точок доступу до транспорту [14]. Для вимірювання доступності широко застосовують ГІС-методи (буферні зони, ізолінії, індекси крокової доступності, аналіз мережевих бар'єрів) [15], а також поєднання даних ГІС для оцінювання пішохідної доступності до зупинок [16]. Цей корпус робіт важливий для проектування «звичайної» безпеки та comfortу, однак у більшості випадків він не інтегрує цивільний захист у логіку транспортного проектування, не пов'язує топологію зупинкової мережі з реально доступними укриттями та рідко розглядає ситуації воєнного стану чи терористичних загроз.

Невирішені частини загальної проблеми, на яких фокусується стаття, такі: по-перше, бракує спеціалізованих метрик, що прямо вимірюють захищеність пасажирів на зупиночних пунктах з урахуванням відстані/часу до найближчого безпечного укриття й особливостей пішохідної мережі; наявні моделі здебільшого оптимізують розміщення укриттів або оцінюють «звичайну» транспортну доступність, не поєднуючи ці дві

площини [2; 7; 10; 15]. По-друге, у літературі фактично відсутнє врахування мережевих станів під час кризи (вимкнення електротранспорту, відхилення маршрутів, блекаути) та вікон попередження, які визначають реальні межі пішохідних ізохрон для пошуку укриття; це критично для міст, що переживають обстріли. По-третє, сучасні дослідження не досліджували розташування (зупинок) по відношенню до захисних споруд, відкалібрований на місцеві стандарти доступу/місткості, та не пропонують відтвореного робочого процесу на базі відкритих даних (OSM). По-четверте, у фокусі зазвичай опиняються системні або маршрутні показники, а просторове вирівнювання ризику на рівні транспортно-аналітичних зон і пріоритезація втручань за очікуваним додатковим ефектом (граничною віддачею) для пасажирів висвітлені недостатньо. Нарешті, для українських міст загалом і Харкова зокрема бракує емпіричних робіт, що спираються на офіційні реєстри укриттів і надають кількісну картину після початку повномасштабної війни (виняток – поодинокі просторові аналізи забезпеченості цивільними спорудами [16, 17]).

Постановка завдання. Мета статті – розробити та апробувати просторово-мережевий підхід до оцінювання безпеки пасажирів на зупинках громадського транспорту в умовах воєнних загроз. Для досягнення мети ставляться такі завдання: зібрати вихідні дані за допомогою відкритих і офіційних даних (OSM, GTFS, міський реєстр укриттів) для генерації пішохідних ізохрон; запропонувати метрику Індексу захищеності пасажирів (ІЗІП) з урахуванням відстані до укриття як відношення кількості досяжних укриттів до кількості зупинок у межах транспортно-аналітичної зони; здійснити порівняльне картографічне оцінювання для Харкова у двох часових зрізах: до початку повномасштабного вторгнення та після його початку, з виявленням просторових кластерів високого/низького ризику; інтерпретувати результати для вироблення пріоритетів інфраструктурних втручань (розміщення зупинок-укриттів, підвищення місткості чинних споруд).

Виклад основного матеріалу. Методологія спирається на інтегровану геобазу PostgreSQL/PostGIS, у якій зібрано всі шари, потрібні для обчислення індикаторів захищеності. Межі міста та 348 транспортно-аналітичних зон (TAZ) імпортовано з шейп-файлів, які були отримані в результаті розробки SUMP. Виконано топологічне очищення та перепроєкцію до WGS

1984 UTM Zone 37N. Пішохідний субстрат побудовано з витягу OpenStreetMap станом на 1 лютого 2024 р. Мережу громадського транспорту реконструйовано з EasyWay: 2019 р. – довоєнна «база», 2024 р. – воєнний стан із припиненнями та об'їздами; обидва фіди розібрано у PTV VISUM 2022. Географію укриттів отримано з міського геопорталу smart.citynet.kharkiv.ua: 1 212 записів (ПРУ, сховища подвійного призначення, зупинки-укриття) з номінальною місткістю; ці значення прийнято як фіксовані через обмеження воєнного часу. Додаткові шари (контури будівель, висоти стін) використовувалися лише для перевірок видимості вибухової хвилі й не входили до розрахунку індексів.

Оброблення даних здійснювалося у зв'язці VISUM–QGIS. У VISUM пішохідний граф із імпедансом (impedance) слугував основою для ізохрон «вікон попередження». Точки зупинок ортогонально «підсаджувалися» до найближчих вузлів графа, а центроїди укриттів під'єднувалися як синтетичні зони з нульовою внутрішньозонною вартістю. Одержані полігони експортувалися до QGIS, де їх розподіляли за часовими класами та виконували просторові приєднання «зупинка–ізохрона» і «TAZ – об'єкти укриття». Після агрегації підраховано кількість укриттів, досяжних хоча б із однієї зупинки кожної зони у межах заданого часу, та кількість зупинок у зоні; далі обчислено ІЗІП.

ІЗІП з урахуванням відстані до укриття було обчислено для кожної транспортно-аналітичної зони міста як відношення кількості досяжних укриттів до кількості зупинок громадського транспорту в межах зони:

$$ІЗІП_i(t_w) = \frac{N_i^S(t_w)}{N_i^N},$$

де N_i^S – число укриттів, що досяжні мережевою пішохідною відстанню за час t_w ($t_w = 10 \text{ хв}$), од.

N_i^N – число зупинок у TAZ i , од.

Значення ІЗІП класифіковано на інтервали, інтерпретації яких та відповідні управлінські дії зведено в табл. 1; саме ці класи й відображено на картах «до початку повномасштабного вторгнення» та «після початку повномасштабного вторгнення».

Картоschema довоєнного стану (Рис. 1) фіксує чітку центр-периферійну поляризацію. У більшості периферійних TAZ індекс має нульове значення, тобто жодне укриття не потрапляє до ізохрони пішого доступу від зупинок у межах обраного вікна попередження. Підвищені зна-

Інтерпретація класів ІЗПР та орієнтовні управлінські дії

Клас ІЗПР	Зміст показника для зупинок у зоні	Характерна просторова картина	Орієнтовні першочергові дії
0	Укриття відсутні в пішій досяжності; зупинки фактично незахищені	Периферійні та промислові TAZ, фрагментована пішохідна мережа	Встановлення зупинок-укриттів, відкриття/приспосовування підвальних приміщень, створення мікрокластерів укриттів біля вузлів пересадок
0–1	Мінімальна доступність: поодинокі укриття або надмірна відстань/обхід	Середній міський пояс, коридори вздовж магістралей	Розширення мережі укриттів, пріоритезація пішохідних маршрутів підходів і навігації, інтеграція з інформаційним оповіщенням
1–2	Помірний рівень: на кожну зупинку припадає одне–два досяжні укриття	Внутрішні райони поза історичним центром	Підвищення місткості й безбар'єрності доступу, співрозміщення зупинок і укриттів, дрібні коригування локацій
2–3	Високий рівень: множинні альтернативи укриття	Центральні транспортні вузли та радіальні осі з підземними об'єктами	Підтримка стану та режимів доступу, регулярні аудити місткості, використання як опорних вузлів мережі
3–4	Дуже високий рівень: надлишок вибору та короткі підходи	Окремі центральні TAZ з концентрацією підземної інфраструктури	Утримання якості, стандартизація рішень і масштабування у зонах 0–1 через типові проекти

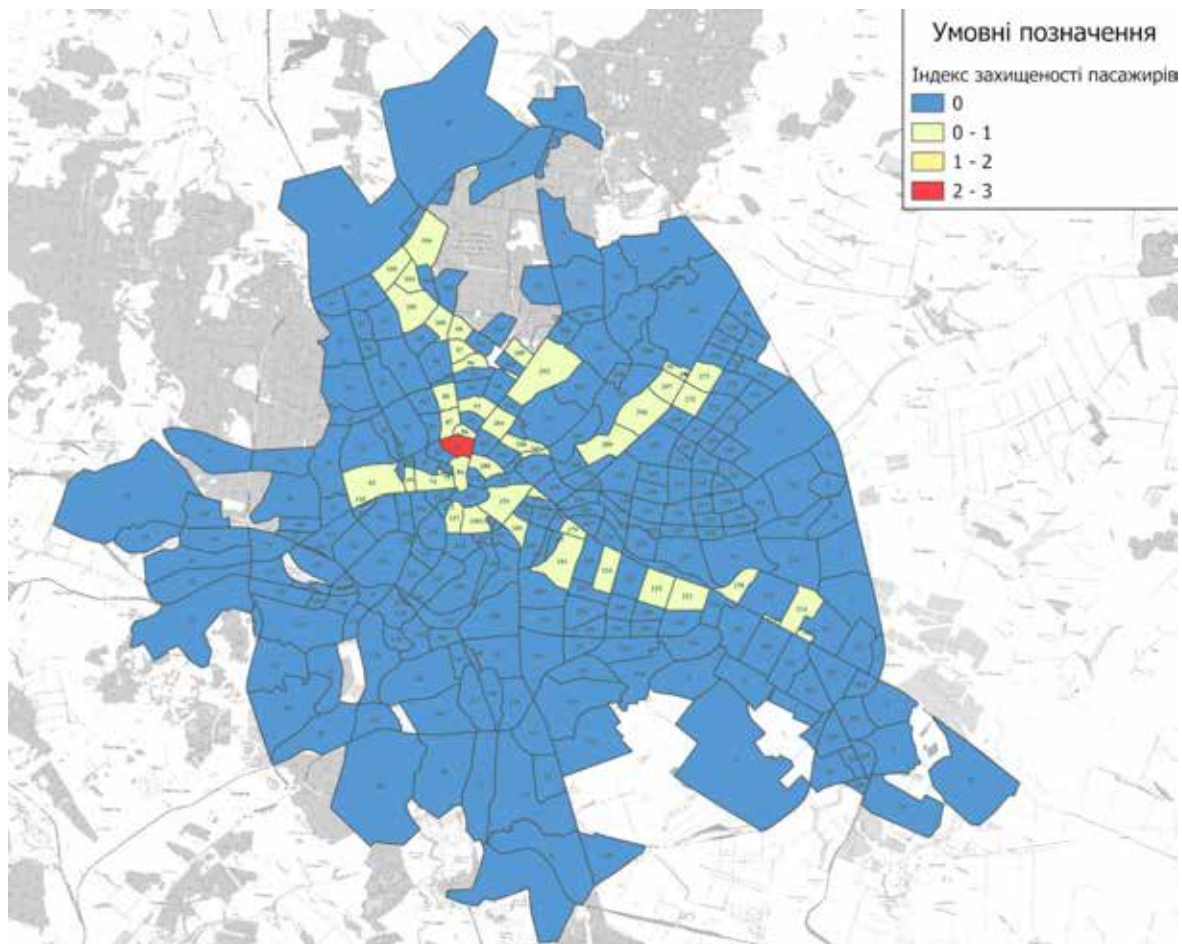


Рис. 1. Значення ІЗПР до початку повномасштабного вторгнення

чення формуються вузькими коридорами уздовж радіальних магістралей, де сконцентровані підземні об'єкти підвищеної міцності (передусім

станції метро й підземні переходи). Окремі центральні зони демонструють максимальні значення ІЗПР завдяки поєднанню високої щільності

зупинок і великої кількості потенційних укриттів у безпосередній близькості. Проте поза історичним ядром мапа перетворюється на суцільне поле незахищеності: навіть незначні розриви у пішохідній мережі та довгі квартальні фронти поза центром не дають сформувати зв'язні області захищеного очікування.

На карті воєнного стану (рис. 2) спостерігається помітна зміна просторового рисунка. Офіційна інвентаризація цивільних споруд захисту та поява спеціалізованих рішень, зокрема зупинок-укриттів, приводять до «потовщення» поясу базової захищеності навколо центру міста. Значна частина TAZ, що до того належала до класу 0, переходить до інтервалу 0–1; у низці центральних і транзитних районів фіксуються вищі інтервали до 3–4 завдяки множинності альтернативних укриттів на відстані короткого пішого підходу. Уточнене мережеве зіставлення зупинок та нових укриттів показує, що приріст індексу локалізується передусім у вузлах пересадок і вздовж магістралей із високою пасажиронапруженістю, тобто там, де співрозміщення цивільного захисту з транспортною інфраструктурою було цілеспрямовано реалізоване.

Порівняння двох часових зрізів демонструє, що середнє значення індексу за містом зросло з 0,18 у довоєнному стані до 0,57 у воєнному. При цьому медіана підвищилася з 0 (мода також дорівнювала нулю) до 0,42, а коефіцієнт варіації зменшився майже вдвічі, що свідчить про певне вирівнювання просторової нерівності. Частка TAZ із нульовим значенням показника скоротилася з 63 % до 29 %, натомість частка зон із ІЗПР між 0 і 1 зросла з 26 % до 48 %. Найвищі значення, понад 2 укриття на зупинку, зафіксовані лише у 4 центральних зонах до вторгнення, а після інвентаризації нових споруд таких зон уже 19; одна з них перевищує поріг 3, що в умовах воєнного конфлікту створює надлишок вибору та підвищує імовірність вільних міст у найближчому укритті.

Картографічний аналіз (рис. 1 та рис. 2) розкриває виразний центр-периферійний градієнт. До 24 лютого 2022 р. лише історичний центр і коридори уздовж станцій метро демонстрували помірний або високий рівень захищеності; решта міста залишалася практично незахищеною. Після розгортання мережі зупинок-укриттів і відкриття підвальних ПРУ утворився суцільний пояс

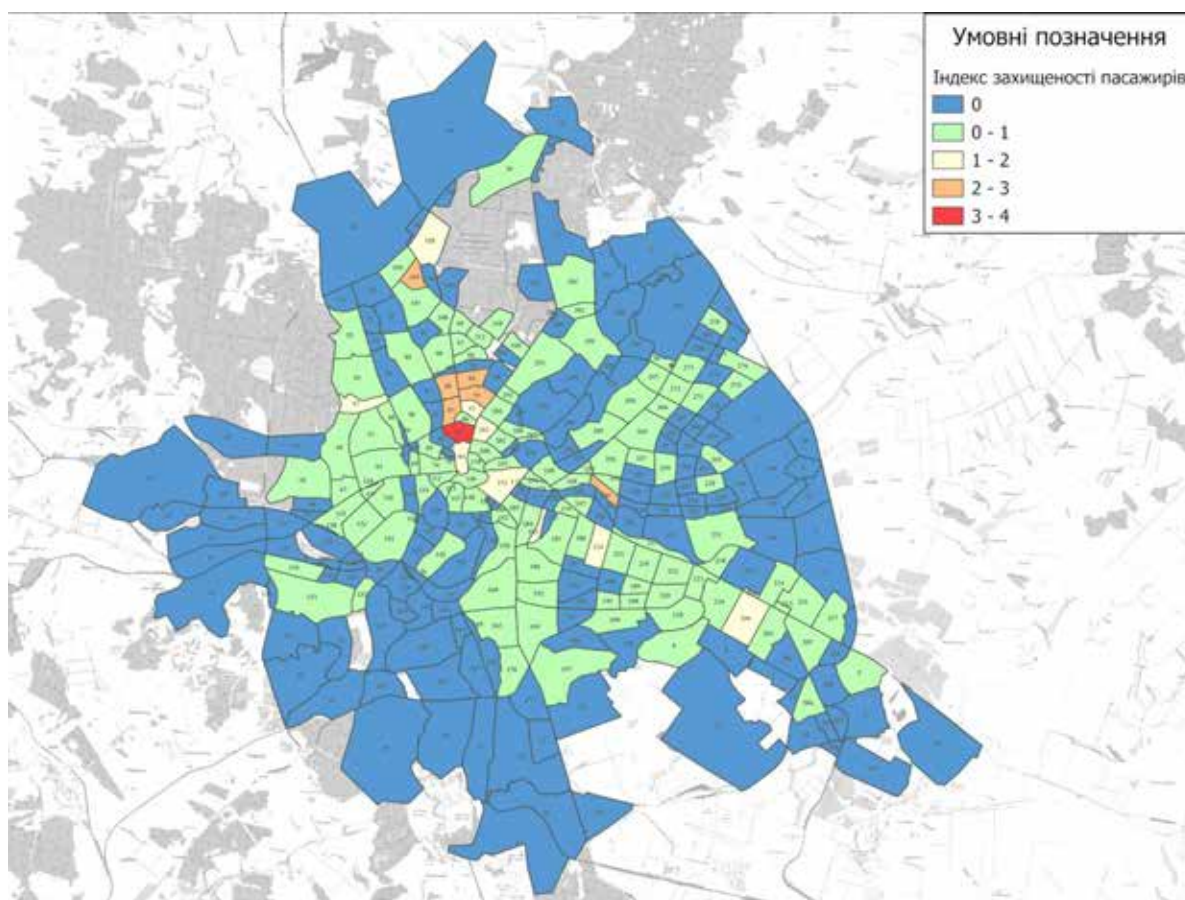


Рис. 2. Значення ІЗПР після початку повномасштабного вторгнення

мінімальної захищеності (клас 0–1) завширшки 3–4 км.

Проте навіть попри прогрес, периферійні та промислові кластери залишаються «блакитними плямами» (клас 0 на рис. 2). Сукупна площа цих зон становить близько 38 % міської території, але на них припадає лише 17 % усіх зупинок і менш ніж 6 % облікових укриттів. Така диспропорція посилюється фрагментованою пішохідною мережею: середня довжина найкоротшого шляху від зупинки до будь-якого потенційного укриття тут перевищує 680 м, що є недосяжним за двохвилинного попередження й граничним за п'ятихвилинного. Окремі промзони демонструють дистанцію понад 1 км, фактично виключаючи можливість дістатися до укриття пішки. Саме на такі вузли осередки вказує стовпець «Пріоритетні інфраструктурні заходи» (табл. 1), що пропонує перелік першочергових інфраструктурних дій.

Додатковим фактором, який пом'якшив просторову нерівність, стала поява тимчасових маршрутів громадського транспорту у 2022–2023 рр., електротранспорт через пошкодження інфраструктури та ризики енергопостачання працював зі скороченнями. Нова автобусна мережа частково покрила (закрила) колишні периферійні зони недостатньої доступності укриттів, але без прокладки нових захисних споруд ефект залишився обмеженим. Для підвищення практичної цінності індексу паралельно було проаналізовано близьку місткість кожного укриття. У центральних районах коефіцієнт місткості перевищує 1,2 відносно середньої годинної пасажиронавантаженості зупинок, тоді як на периферії показник падає нижче 0,4, а іноді виявляється близьким до нуля, коли єдине укриття в межах ізохроні не може прийняти навіть половини потенційних пасажирів. Це доповнює картину, побудовану лише на простому бінарному критерії наявності/відсутності укриття, та вказує на необхідність поєднати розгортання нових об'єктів із підвищенням місткості існуючих.

Якісна інтерпретація сукупних результатів узагальнена в табл. 1, де кожному класу ІЗПР співвіднесено характерне просторове положення в Харкові та рекомендований набір управлінських дій. Послідовне коригування транспортної мережі та мережі укриттів відповідно до цієї градації дозволило б за два роки знизити долю зон із нульовим індексом щонайменше удвічі й підняти середнє значення індексу до 0,8, тобто наблизитися до рівня європейських міст із розвинутою системою цивільної оборони.

Висновки. Дослідження показало, що пасажирська безпека є вимірюваною та керованою характеристикою транспортної системи за умови інтеграції логіки цивільного захисту у просторово-мережевий аналіз. Запропонований підхід дав змогу сформувати відтворювану метрику ІЗПР та картографічно виділити території з різним рівнем реальної захищеності. Емпірична апробація, на кейсі Харкова, продемонструвала суттєве покращення індикатора: після початку повномасштабної війни частина «нульових» зон перейшла у класи мінімальної й помірної захищеності завдяки появі та інвентаризації укриттів біля зупинок, тоді як периферійні та промислові кластери залишилися без змін.

Теоретичний внесок полягає у формуванні відтворюваного обчислювального механізму на відкритих і офіційних даних, придатного для масштабування на інші міста та сценарії. ІЗПР, на відміну від суто транспортних показників доступності, фокусується на ключовому для виживання питанні – наявності найближчого ефективного укриття в межах короткого «вікна попередження» – і тому може слугувати новим цільовим індикатором у SUMP, програмах безпеки дорожнього руху та муніципальних стандартах експлуатації зупинкової мережі. Практичний результат дослідження полягає у створенні кількісної бази для адресного зниження ризику для пасажирів: міські управлінці отримують інструмент і карту, що вказують, де розміщення укриття ближче до зупинки забезпечить найбільший додатковий ефект, а перевізники – підстави для перегляду конфігурації зупинок і пішохідних підходів із максимальним впливом на безпеку.

Перспективи подальших досліджень визначають із зазначених обмежень та з потреби зробити ІЗПР операційним стандартом. По-перше, доцільно розширити метрику до ємнісно-чутливої версії з призначенням пасажирів на укриття та урахуванням часу входу, черг і пропускної спроможності руху від зупинок до укриттів. По-друге, варто інтегрувати реальні профілі швидкості для різних груп населення, перекалібрувати ваги ребер пішохідної мережі з урахуванням якості інфраструктури та бар'єрів доступності, а також тестувати чутливість до різних часових інтервалів попередження та режимів оповіщення. Нарешті, метод слід масштабувати на інші українські міста й міжнародні приклади, що стикаються з ризиками воєнних або техногенних інцидентів, щоб сформувати порівняльні еталони (бенчмарки) та узгоджені регуляторні орієнтири.

Список літератури:

1. Hadas, Y.; Laor, A. Network Design Model with Evacuation Constraints // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2013. – Vol. 47. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.tra.2012.10.027.
2. Chen, W.; Fang, Y.; Zhai, Q.; Wang, W.; Zhang, Y. Assessing Emergency Shelter Demand Using POI Data and Evacuation Simulation // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9. – Article 0041. – DOI: 10.3390/ijgi9010041.
3. Bayram, V.; Yaman, H. Shelter Location and Evacuation Route Assignment Under Uncertainty: A Benders Decomposition Approach // *Transportation Science*. – 2017. – Vol. 52. – P. 416–436. – DOI: 10.1287/trsc.2016.0720.
4. Tun, E.; Nishikiori, T.; Varghese, V.; Chikaraishi, M.; Seike, M.; Fujiwara, A. Emergency shelter location–allocation analysis with time-varying demand // *Asian Transport Studies*. – 2024. – Vol. 10. – Article 100152. – DOI: 10.1016/j.eastsj.2024.100152.
5. de Albuquerque, N. L. B.; da Silva, L. B. L.; Alencar, M. H.; de Almeida, A. T. A multicriteria decision model to improve emergency preparedness: Locating-allocating urban shelters against floods // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2024. – Vol. 11. – Article 104695. – DOI: 10.1016/j.ijdrr.2024.104695.
6. Zhonghui, J.; Zheng, H.; Jiaxuan, Z. Integrated approach for flood shelter site selection and emergency response accessibility analysis at the provincial scale: a case study in Henan, China // *Journal of Water and Climate Change*. – 2024. – Vol. 15, № 10. – P. 5291–5308. – DOI: 10.2166/wcc.2024.475.
7. Liang, Y.; Xie, Z.; Chen, S.; Xu, Y.; Xin, Z.; Yang, S.; Jian, H.; Wang, Q. Spatial Accessibility of Urban Emergency Shelters Based on Ga2SFCA and Its Improved Method: A Case Study of Kunming, China // *Journal of Urban Planning and Development*. – 2023. – Vol. 149. – Article 04023025. – DOI: 10.1061/jupddm.upeng-4325.
8. Ma, Y.; Xu, W.; Qin, L.; Zhao, X. Site Selection Models in Natural Disaster Shelters: A Review // *Sustainability*. – 2019. – Vol. 11, № 2. – Article 399. – DOI: 10.3390/su11020399.
9. Eriskin, L.; Karatas, M. Applying Robust Optimization to the Shelter Location–Allocation Problem: A Case Study for Istanbul // *Annals of Operations Research*. – 2024. – Vol. 339. – P. 1589–1635. – DOI: 10.1007/s10479-022-04627-1.
10. Yu, J.; Zhang, C.; Wen, J.; Li, W.; Liu, R.; Xu, H. Integrating Multi-Agent Evacuation Simulation and Multi-Criteria Evaluation for Spatial Allocation of Urban Emergency Shelters // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2018. – Vol. 32. – P. 1884–1910. – DOI: 10.1080/13658816.2018.1463442.
11. Abenoza, R. F.; Ceccato, V.; Susilo, Y. O.; Cats, O. Individual, Travel, and Bus Stop Characteristics Influencing Travelers' Safety Perceptions // *Transportation Research Record*. – 2018. – Vol. 2672. – P. 19–28. – DOI: 10.1177/0361198118758677.
12. Phillips, R. O.; Hagen, O. H.; Berge, S. H. Bus Stop Design and Traffic Safety: An Explorative Analysis // *Accident Analysis & Prevention*. – 2021. – Vol. 153. – Article 105917. – DOI: 10.1016/j.aap.2020.105917.
13. Ulak, M. B.; Kocatepe, A.; Yazici, A.; Ozguven, E. E.; Kumar, A. A Stop Safety Index to Address Pedestrian Safety around Bus Stops // *Safety Science*. – 2021. – Vol. 133. – Article 105017. – DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105017.
14. Samani, R. R.; Amador-Jimenez, L. Exploring Road Safety of Pedestrians in Proximity to Public Transit Access Points (Bus Stops and Metro Stations): A Case Study of Montreal, Canada // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 50. – P. 536–547. – DOI: 10.1139/cjce-2022-0309.
15. Kraft, S. Measuring and modelling the spatial accessibility of public transport stops in GIS // *Hungarian Geographical Bulletin*. – 2016. – Vol. 65, № 1. – P. 57–69. – DOI: 10.15201/hungeobull.65.1.5.
16. Galkin, A., Samchuk, G., Lyfenko, S., Botsman, A., Braterska, N., Hriekova, O., Drobotova Ye. & Tolmachov, I. Planning passafeguard in conflict zones and assessment of public transport stop accessibility to shelters // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2025. – T. 201. – C. 104669. DOI: 10.1016/j.tra.2025.104669

Galkin A.S., Samchuk G.O., Lyfenk S.E., Skrypin V.S. SPATIAL-NETWORK APPROACH TO PASSENGER SAFETY ASSESSMENT ON STOPS

The paper proposes a spatial-network approach to quantitatively assess passenger safety in the before-boarding phase, at surface public transport stops where, during air-raid alerts, the “warning window” is measured in minutes. The core problem is a regulatory-operational gap: unlike buildings and underground stations governed by explicit safety standards, surface stops are typically treated as street furniture with no obligation to provide nearby protective shelters. Our objective is to embed civil-protection logic into transport planning and to introduce a metric that directly captures the safety of a person waiting at a stop. We develop a reproducible data pipeline combining open and official sources: an OSM-based pedestrian network (assumed walking speed 5 km/h with stair penalties), reconstructing stop layers for pre-invasion and conflict-time conditions, and the city registry of 1,212 civil-defence facilities (anti-radiation shelters, dual-use structures,

modular shelter-stops). For 348 Transport Analysis Zones (TAZ) in Kharkiv we compute the Passenger Protection Index (PPI) defined as the ratio of shelters reachable within short pedestrian isochrones from stops to the number of stops in the zone. Isochrones are generated in VISUM on the pedestrian graph; aggregation and mapping are performed in QGIS/PostGIS. A two-period comparison indicates a substantial improvement in city-wide protection: the mean PPI rises (approximately from 0.18 to 0.57) and the share of zones with zero protection declines (from 63 % to 29 %), reflecting the deployment and inventory of shelters near stops. Yet a pronounced centre-periphery gradient persists: a broad ring of minimal protection (0–1) encircles the inner city, while peripheral and industrial clusters remain “safety deserts.” Class-based interpretation of PPI enables prioritisation by marginal benefit and translates directly into an intervention portfolio: deploying modular shelter-stops, increasing facility capacity, improving pedestrian approaches, and adjusting stop locations. The method generalises to other cities and emergency contexts (war, terror, industrial incidents); the metric itself can serve as a new KPI within Sustainable Urban Mobility Plans (SUMP) and road-safety programmes. Study limitations, nominal stop/shelter coordinates and registry capacities, limited treatment of access barriers and behavioural responses, motivate future work on capacity-sensitive assignments with queuing, user-group-specific speeds and impedances, and integration with an urban digital twin for real-time risk precomputation. Overall, the proposed framework closes a critical gap between transport accessibility and civil protection, providing a practical basis for targeted policies that reduce spatial inequalities in passenger risk.

Key words: *Passenger Protection Index (PPI), public transport safety, shelter-stops, pedestrian isochrones, Transport Analysis Zones (TAZ), shelter accessibility, civil defense, urban mobility resilience.*

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 08.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Кириллова О.В.

Одеський національний морський університет

Кириллова В.Ю.

Одеський національний морський університет

ПРИВАТИЗАЦІЯ ПОРТІВ: РИЗИКИ, РЕГУЛЯТОРНІ МЕХАНІЗМИ ТА СТРАТЕГІЧНІ АЛЬТЕРНАТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ

У статті досліджується одна з ключових тем сучасної портової політики – приватизація портової інфраструктури, з особливим акцентом на міжнародний досвід та український контекст. Обґрунтовано, що повна приватизація стратегічних активів у сфері водного транспорту не є домінуючою світовою практикою, а радше винятком. Зазначено, що більшість провідних країн світу зберігають державну власність на ключові портові об'єкти, водночас залучаючи приватний капітал через механізми концесій, оренди або державно-приватного партнерства. Аналіз охоплює практики Сінгапуру, Китаю, Об'єднаних Арабських Еміратів, Європейського Союзу, а також проблемні кейси Австралії та країн Латинської Америки. Розглянуто український досвід реалізації концесій у портах Херсон і Ольвія, а також перші в історії України приклади приватизації портів Усть-Дунайськ і Білгород-Дністровський. Ці кейси продемонстрували як потенційні переваги, так і виклики процесу реформування портового сектору. У цьому контексті акцентовано увагу на необхідності системного впровадження ефективних механізмів контролю та стримування ризиків, здатних забезпечити збалансоване поєднання економічної доцільності приватного залучення із захистом стратегічних інтересів держави. Визначено основні ризики приватизації портів, зокрема: монополізацію ринку, втрату стратегічного контролю, погіршення соціальних стандартів і загрозу національній безпеці, особливо в умовах воєнного стану. В якості запобіжників запропоновано: збереження державної власності на землю та гідротехнічні споруди, впровадження дієвого антимонopolного регулювання, контрактне закріплення соціальних, інвестиційних та екологічних зобов'язань приватних операторів. Обґрунтовано, що стратегічна участь держави у портовому секторі – це не анахронізм, а сучасна та ефективна відповідь на виклики геоekonomіки, транспортної безпеки та захисту критичної інфраструктури. Зроблено висновок про доцільність поєднання моделей державного контролю з гнучкими інструментами залучення приватного капіталу, що дозволяє забезпечити баланс між економічною ефективністю, соціальною відповідальністю та стратегічною безпекою.

Ключові слова: водний транспорт, транспортний вузол, порт, портовий термінал, портовий сектор, портова інфраструктура, транспортна інфраструктура, приватизація портів, концесія, державно-приватне партнерство, державна власність, транспортна безпека, національна безпека, інвестиційні механізми, управління портами.

Постановка проблеми. Приватизація портової інфраструктури є однією з найбільш дискусійних тем у сфері управління транспортними активами. Світова практика демонструє як приклади успішного залучення приватного капіталу в портовий сектор, так і ситуації, коли передача стратегічних об'єктів у приватну власність призвела до втрати державного контролю, зниження соціальних стандартів, а іноді – до ослаблення національного суверенітету в ключових секторах економіки. В умовах воєнного стану та майбутньої післявоєнної відбудови України питання при-

ватизації портів набуває особливої актуальності: з одного боку, країна гостро потребує залучення інвестицій, з іншого – надзвичайно важливо зберегти стратегічний контроль над інфраструктурою, яка є критично важливою для забезпечення національної безпеки, економічної стійкості та збереження геоekonomічної суб'єктності держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика приватизації українських портів висвітлюється у низці фахових публіцистичних та наукових джерел, зокрема в монографіях, наукових статтях і матеріалах міжнародних кон-

ференцій. Зокрема, ще у 2017 році під час Другої Всеукраїнської науково-технічної конференції «Морська інфраструктура України: проблеми та перспективи розвитку» (Миколаїв: НУК) у доповіді професора О.В. Кириллової на тему «Українські порти: приватизація або державно-приватне партнерство» було акцентовано увагу на ризиках прямої приватизації портів та обґрунтовано доцільність впровадження механізмів державно-приватного партнерства.

У монографії [1] та публікації [2] чітко зазначено, що повна приватизація є крайнім і високо-ризиковим сценарієм реформування портового сектору, оскільки:

- передбачає повну відсутність участі держави в управлінні портовою галуззю;
- призводить до втрати контролю над критичними інфраструктурними об'єктами.

Особливо показовим у цьому контексті є австралійський досвід. Як вказано у [1], дослідження, проведене Морським союзом Австралії (Maritime Union of Australia) спільно з Постійним комітетом Сенату з економіки, засвідчило, що приватизація прибуткових портів країни виявилася економічно необґрунтованою. Урядові було рекомендовано зупинити приватизаційний процес, щоб запобігти втратам, які могли б перекласти на платників податків.

У спеціальному звіті European Court of Auditors (2016) [3] подано критичний аналіз європейських портових інвестицій. Окремо підкреслено, що непрозорі або поспішні рішення щодо приватизації не лише не підвищують ефективність, а й створюють загрози монополізації та нераціонального використання державних активів.

Значний науковий і практичний внесок у розроблення моделей трансформації портової власності зробили міжнародні організації.

У публікаціях World Bank («Port Reform Toolkit», 2011) та UNCTAD («Review of Maritime Transport», 2023) [4] наголошено, що найбільш прийнятними підходами до залучення приватного капіталу є концесійні угоди, моделі державно-приватного партнерства та довгострокова оренда. Ці форми, на відміну від повної приватизації, дозволяють забезпечити необхідні інвестиції та операційну ефективність без втрати контролю з боку держави.

У звіті OECD/ITF (2017) [5] підкреслено, що найбільш поширеною моделлю управління у сучасному світі є модель «Landlord Port», за якої держава зберігає власність на інфраструктуру, а приватні оператори отримують концесію

на виконання термінальних або транспортно-операційних функцій. Такий підхід визнається оптимальним з точки зору балансу між державними інтересами і ефективністю приватного управління. Це питання також розглядалося і в роботі [2].

Крім того, у щорічному звіті UNCTAD «Review of Maritime Transport 2023» [4] зафіксовано позитивну динаміку зростання доходів портової галузі саме у країнах, де активно впроваджуються концесійні механізми. Звіт акцентує увагу на тому, що ефективність управління портами значною мірою залежить від якості контрактів та здатності держави регулювати діяльність приватних операторів.

Загалом, аналіз міжнародної та національної літератури засвідчує наявність сталої позиції: повна приватизація портів як форма остаточного відчуження державної інфраструктури є радше винятком, ніж загальноприйнятою практикою. Натомість основними механізмами залучення приватного капіталу до портового сектору виступають концесії, довгострокова оренда або державно-приватне партнерство. На відміну від приватизації, ці інструменти не передбачають втрати державою права власності на інфраструктурні об'єкти. Такий підхід дозволяє поєднувати інтереси держави та інвесторів, забезпечуючи при цьому стратегічний контроль за розвитком портової галузі.

З урахуванням викладеного, логічним є перехід до формулювання мети дослідження, що дозволить зосередитися на аналізі національного та міжнародного досвіду приватизації портових активів і визначенні ефективних механізмів їх трансформації.

Постановка завдання. Мета статті – проаналізувати міжнародний та український досвід приватизації портових активів, зосередивши увагу на моделях управління портами, механізмах мінімізації ризиків передачі інфраструктури у приватні руки, а також на альтернативних стратегіях збереження державного контролю як одного з ефективних механізмів розвитку портового сектору.

Відповідно до поставленої мети, у дослідженні визначено такі основні завдання:

1. Дослідити міжнародні моделі управління портами та проаналізувати український досвід впровадження концесій і приватизацій у портовому секторі.

2. Виявити та систематизувати інституційні механізми стримування ризиків приватизації портової інфраструктури з акцентом на правових, економічних та соціальних інструментах.

3. Обґрунтувати державну участь у портовому секторі як стратегічну альтернативу повній приватизації, на основі аналізу світового досвіду провідних портових операторів.

Виклад основного матеріалу. У сучасному світі питання форми управління портами безпосередньо пов'язане з рівнем національної економічної безпеки, ефективністю використання інфраструктури та залученням інвестицій. У цьому контексті глобальна практика демонструє широкий спектр моделей – від повної державної власності до повної приватизації, включаючи гібридні форми державно-приватного партнерства [2].

Прагнення України реформувати портову галузь відповідно до сучасних викликів та інтегруватися в глобальний економічний простір супроводжується активним пошуком оптимальних механізмів залучення інвестицій, модернізації інфраструктури та забезпечення стратегічного контролю. У зв'язку з цим, надзвичайно важливим є аналіз не лише теоретичних підходів до управління портами, а й конкретного міжнародного та національного досвіду реалізації концесій, приватизації та інших форм трансформації портової політики.

Саме з огляду на ці обставини, далі розглядаються ключові моделі управління портами, приклади їх впровадження в окремих країнах світу, а також специфіка та динаміка реформ у портовому секторі України до і після 2022 року.

1. Моделі управління портами у міжнародній практиці та український досвід концесій й приватизації

У світовій практиці виокремлюють чотири основні моделі управління портами: сервісний порт (Service Port), порт-інструмент (Tool Port), порт-лендлорд (Landlord Port) та приватний порт (Private Port), особливості яких детально описано у роботі [2].

Найбільш радикальні приклади повної приватизації портів спостерігаються у Великій Британії, яка внаслідок реформ 1980-х років передала більшість портових активів у приватну власність без збереження регуляторної функції держави. Подібний підхід був реалізований і в Новій Зеландії, де відбулася часткова або повна приватизація інфраструктури окремих портів, зокрема в Окленді та інших регіонах країни.

У країнах Латинської Америки, зокрема в Аргентині, реалізується модель державно-приватного партнерства, що базується на механізмах довгострокових концесій. Водночас, як свідчить досвід портів Буенос-Айреса та Росаріо, надмірна

приватизація у поєднанні з недостатнім контрактним контролем з боку держави призвела до скорочення довгострокових інвестицій та неефективного управління термінальною інфраструктурою [6].

У країнах Європейського Союзу переважає модель «Landlord Port», за якої інфраструктура портів залишається у державній або муніципальній власності, тоді як операційна діяльність делегується приватним компаніям на основі концесійних або довгострокових орендних договорів. Зокрема, у Франції, Німеччині, Італії та Нідерландах держава зберігає стратегічний контроль над портовим сектором, використовуючи концесійний механізм як ефективний інструмент залучення приватних інвестицій [7].

Згідно з даними OECD/ITF [5], модель «Landlord Port» є найбільш поширеною у світовій практиці управління портами. У межах цієї моделі держава зберігає право власності на земельні ділянки та гідротехнічні споруди, тоді як приватні компанії здійснюють термінальні операції на основі концесійних договорів або довгострокової оренди. Такий підхід вважається збалансованим з точки зору ефективності, інвестиційної привабливості та збереження національного суверенітету.

UNCTAD у щорічному звіті «Review of Maritime Transport 2023» [4] зазначає, що країни, які впровадили концесійні механізми, демонструють стабільне зростання доходів у портовому секторі. Окремо підкреслюється важливість ефективного контрактного управління та належного державного регулювання як ключових умов успішності таких підходів.

Водночас, у звіті European Court of Auditors за 2016 рік [6] наведено оцінку, що приблизно третина інвестицій ЄС у портову інфраструктуру між 2000 і 2013 роками була неефективною та погано спланованою. Це – показовий приклад того, як поспішна приватизація та недостатній контроль можуть порушувати інтереси держав і суспільства. Незважаючи на дату публікації, звіт зберігає актуальність і сьогодні, слугуючи авторитетним джерелом для оцінки наслідків непрозорих приватизаційних процесів у портовій сфері ЄС.

До початку повномасштабної війни Україна активно впроваджувала модель концесійних угод як основний механізм залучення приватного капіталу в портову сферу. У 2019 році було проведено два масштабних концесійних конкурси, які заклали підґрунтя для подальших реформ.

Зокрема, у січні 2019 році відбувся перший в Україні кейс концесії. Концесію на Херсон-

ський морський порт здобув «Risoil-Kherson LLC», створений як консорціум компаній «Petro Oil & Chemicals LLC» (Грузія) та «RISOIL S.A.» (Швейцарія) [9]. За умовами договору, консорціум отримав право експлуатації порту строком на 30 років, взяв на себе інвестиційні зобов'язання у розмірі 318 млн. грн., щорічно сплачуватиме 7 % доходу до державного бюджету та здійснить одноразовий платіж у розмірі 12 млн. грн.

20 серпня 2020 року підписано концесійну угоду строком на 35 років щодо спеціалізованого морського порту «Ольвія» між Міністерством інфраструктури України, ДП «Адміністрація морських портів України», катарською компанією «QTerminals W.L.L.» та українською компанією ТОВ «Кютерміналз Ольвія». «QTerminals W.L.L.» є провідним портовим оператором Катару та управляє найбільшим торговим портом країни – портом Хамад. Відповідно до умов договору, інвестиційні зобов'язання компанії становлять 3,4 млрд. грн., з яких значна частина має бути освоєна протягом перших п'яти років реалізації проєкту. Крім того, передбачено щорічні платежі до державного бюджету в розмірі 82 млн. грн., що у 16 разів перевищує чистий прибуток порту за 2019 рік. Окремим пунктом угоди закріплено зобов'язання концесіонера інвестувати 80 млн. грн. у розвиток міської інфраструктури Миколаєва [10].

У 2023 році, попри війну, Україна запустила новий етап трансформації портового сектору – приватизацію портових активів.

Першим в історії незалежності України приватизованим портом став порт «Усть-Дунайськ». Аукціон відбувся 17 січня 2023 року: стартова ціна зросла зі 60 млн. грн. до 150 млн. грн., а переможцем торгів стала компанія «Еліксир Україна», яка придбала порт за 201 млн. грн [11]. 24 серпня 2023 року було підписано акт прийому-передачі майнового комплексу, і об'єкт офіційно перейшов у приватну власність.

У листопаді 2024 року було завершено приватизацію ще одного українського порту – ДП «Білгород-Дністровський морський торговельний порт». Після численних спроб продажу, 13-й за рахунком аукціон, що відбувся 7 листопада 2024 року, завершився результативно. Початкова ціна складала 88,99 млн. грн., а переможець – ТОВ «Топ-Оффер», запропонував 90 млн. грн. за актив [12]. Це відкриває новий етап у функціонуванні порту, який протягом багатьох років демонстрував нестабільні показники діяльності.

Попри активізацію приватизаційних процесів, значна частина експертного середовища застерігає від передачі критичної інфраструктури у приватні руки без належного регулювання.

До основних ризиків належать: монополізація портового ринку, втрата стратегічного контролю, погіршення соціальних стандартів, екологічні загрози, а також ризики для національної безпеки – особливо в умовах повномасштабної війни.

Міжнародний досвід свідчить, що найбільш ефективними є моделі державно-приватного партнерства з чітко регламентованими умовами, які дозволяють забезпечити баланс між приватною ініціативою та державним контролем.

2. Інституційні механізми стримування ризиків приватизації портової інфраструктури

Для мінімізації потенційних ризиків, пов'язаних із передачею портової інфраструктури приватним суб'єктам, надзвичайно важливо впроваджувати системні запобіжники як на законодавчому, так і на контрактному рівнях

По-перше, необхідно забезпечити ефективне антимонопольне регулювання та запобігти створенню або посиленню домінуючого становища окремих гравців на ринку портових послуг. Це особливо важливо в умовах обмеженої кількості глибоководних портів та концентрації вантажопотоків.

По-друге, критична інфраструктура, зокрема портова земля, причали, підхідні канали, гідротехнічні споруди, повинна залишатися у державній власності або під контролем стратегічного суб'єкта публічного права, навіть у разі передачі операційної діяльності приватному сектору. Передача в оренду чи концесію не має перетворюватися на де-факто втрату контролю.

По-третє, концесійні угоди та договори про відчуження майна, тобто приватизацію, повинні містити обов'язкові соціальні, інвестиційні та екологічні зобов'язання. Зокрема:

- гарантії збереження робочих місць та рівня оплати праці;
- зобов'язання щодо дотримання стандартів безпеки, екологічного захисту та енергоефективності;
- обов'язкова звітність щодо виконання умов договору з боку приватного партнера;
- механізми розірвання договору у разі систематичних порушень.

Комплексне впровадження таких механізмів дає змогу збалансувати інтереси держави, інвестора, місцевих громад та працівників галузі.

3. Міжнародна практика управління портами: державна власність як стратегічна альтернатива повній приватизації

Попри публічні заяви окремих представників українського уряду про те, що «виключно приватизація та приватний сектор можуть забезпечити стійкий розвиток національних портів» і що це «єдиний можливий шлях портових реформ», міжнародна практика демонструє іншу картину. У провідних країнах світу модель повної приватизації портової інфраструктури застосовується вкрай рідко. Натомість ефективність розвитку портової галузі забезпечується завдяки збереженню стратегічного державного контролю та гнучкому залученню приватного капіталу через механізми концесій, державно-приватного партнерства або муніципального управління.

У такому підході немає жодного прояву архаїчного мислення чи консерватизму. Навпаки – це зважена і відповідальна відповідь на глобальні виклики, що стосуються транспорту, енергетичної безпеки, гео економічного впливу, а також захисту критичної інфраструктури. Відповідно, стратегія реформування портового сектору України має базуватись не на деклараціях, а на перевірених моделях, які вже довели свою ефективність у міжнародній практиці.

Особливу увагу привертає послідовна політика провідних держав у збереженні впливу на власні портові активи. У сучасному глобальному портовому секторі значна частина найуспішніших операторів є повністю або частково державними компаніями. Це не виняток, а усвідомлена стратегія, спрямована на реалізацію національних інтересів у критично важливій сфері.

До ключових прикладів державної присутності у глобальному портовому секторі належать:

- PSA International (Сінгапур) – державна компанія, яка управляє понад 50 терміналами на чотирьох континентах, включаючи Азію, Європу та Америку. Компанія повністю належить «Temasek Holdings» – суверенному інвестфонду уряду Сінгапуру;

- China Merchants Port Holdings (Китай) – дочірня структура державного холдингу «China Merchants Group», що володіє та контролює стратегічні портові активи в Китаї, Африці, Південній Америці, на Близькому Сході та в Європі (зокрема – частка у порту Гамбург);

- DP World (Об'єднані Арабські Емірати, ОАЕ) – глобальний оператор, підконтрольний уряду емірату Дубай через холдинг «Dubai World».

Компанія оперує більш ніж у 70 країнах, інвестуючи в логістичні, портові та економічні зони;

- AD Ports Group (Абу-Дабі, ОАЕ) – повністю державна компанія, яка управляє всіма комерційними портами Об'єднаних Арабських Еміратів та активно реалізує зовнішню інвестиційну експансію. Серед ключових напрямів її інфраструктурних проєктів – Єгипет, Індія, Казахстан та країни Східної Африки.

Наявність у структурі власності урядових інституцій забезпечує цим глобальним портовим операторам:

- довгострокову стабільність і стратегічне планування;

- доступ до державного фінансування і національних інвестиційних фондів;

- можливість реалізовувати соціально значущі проєкти, які не завжди є рентабельними для приватного капіталу;

- геополітичну гнучкість і стійкість до глобальних криз.

Наведені приклади переконливо свідчать, що державна присутність у портовому секторі не лише не знижує його ефективності, а навпаки – є ключовим фактором забезпечення стабільного управління, інфраструктурної безпеки та реалізації національних інтересів. Це особливо важливо в умовах зростаючої конкуренції за контроль над глобальними транспортними артеріями, енергетичними коридорами та інвестиційними потоками у сфері морської інфраструктури.

Висновки. 1. Проведене дослідження підтверджує, що у глобальній портовій практиці домінують моделі управління, які передбачають активну участь держави у збереженні власності на стратегічну інфраструктуру при одночасному залученні приватного капіталу через концесії, оренду або інші форми державно-приватного партнерства. Повна приватизація портів у світовому масштабі є радше винятком, ніж нормою, і зазвичай супроводжується суттєвими ризиками – від втрати стратегічного контролю до виникнення монополій і зниження соціальних та екологічних стандартів.

2. Український досвід концесійних проєктів (Херсон, Ольвія) та перших випадків приватизації (Усть-Дунайськ, Білгород-Дністровський) показує як потенціал таких трансформацій, так і необхідність встановлення чітких рамок для мінімізації ризиків. Особливої ваги набуває забезпечення прозорих, контрактно закріплених зобов'язань щодо інвестицій, збереження робочих місць, екологічної відповідальності та можливості ефективного державного контролю.

3. З урахуванням аналізу міжнародного досвіду, особливо практики Сінгапуру, Китаю, ОАЕ, обґрунтовано, що державна власність на порти є не архаїзмом, а стратегічною альтернативою приватизації – з урахуванням функцій національної безпеки, гео економічної стійкості та необхідності гарантувати суспільний інтерес у сфері критичної інфраструктури.

Таким чином, в умовах воєнного стану та майбутньої відбудови, доцільною видається модель реформування портового сектору України, що ґрунтується на:

- збереженні права власності на інфраструктуру за державою;
- використанні ефективних інструментів державно-приватного партнерства;
- створенні дієвих інституційних механізмів контролю за приватними операторами;
- формуванні чіткої, проактивної політики державної участі у сфері портового управління.

Це дозволить забезпечити одночасно інвестиційну привабливість, операційну ефективність та стратегічну безпеку портової галузі України.

Список літератури:

1. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Теоретичні основи просторової та функціональної еволюції портів і портових систем. *Проблеми функціонування та розвитку портів*: монографія / за ред. О.В. Кириллової, І.М. Іванової. Львів-Торунь: Liha-Pres, 2022. Т. 7. 438 с. (Серія «Транспортні системи і технології»). DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-289-3>.
2. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Класичні системи управління портами та їх концептуальні моделі. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2023. № 24. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24>.
3. European Court of Auditors. Special Report No 23/2015: Maritime transport in the EU: in troubled waters – much ineffective and unsustainable investment. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. URL: https://www.eca.europa.eu/en/publications/SR16_23?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 06.07.2025).
4. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2023. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2023. URL: <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2023> (дата звернення: 06.07.2025).
5. International Transport Forum. Local Governments and Ports. ITF Policy Papers No. 31. Paris: OECD Publishing, 2017. DOI: 10.1787/820a7ecb-en. URL: <https://surl.li/zbceow> (дата звернення: 06.07.2025).
6. European Court of Auditors. Special report: EU port investments. Luxembourg, 2022. URL: <https://www.eca.europa.eu/en/Pages/DocItem.aspx?did=61063> (дата звернення: 06.07.2025).
7. Notteboom T. Chapter 19. Concession Agreements as Port Governance Tools // *Research in Transportation Economics*. 2006. Vol. 17, No. 1. P. 437–455. DOI: 10.1016/S0739-8859(06)17019-5.
8. European Commission. Ports: an engine for growth. EUR-Lex. *Access to European Union law*. COM(2013)295. URL: <https://surl.li/nwczuo> (дата звернення: 06.07.2025).
9. Концесія спеціалізованого морського порту «Херсон» // *Державна організація «Агенція з питань підтримки державно-приватного партнерства»*. URL: <https://surl.li/ccxwrygr> (дата звернення: 06.07.2025).
10. Договір концесії порту Ольвія узгодили // *Elevatorist.com*. URL: <https://surl.li/qabdgf> (дата звернення: 06.07.2025).
11. Букатюк У. В Україні вперше приватизували порт. «Усть-Дунайськ» офіційно перейшов новому власнику // *Forbes Ukraine*. URL: <https://surl.li/axgmaK> (дата звернення: 06.07.2025).
12. Як Білгород-Дністровський порт отримав шанс на майбутнє // *Судноплавство. Міжнар. морський журнал*. URL: <https://surl.li/nrxjtg> (дата звернення: 06.07.2025).

Kyryllova O.V., Kyryllova V.Yu. PORT PRIVATIZATION: RISKS, REGULATORY MECHANISMS, AND STRATEGIC ALTERNATIVES FOR UKRAINE

The article examines one of the key issues of contemporary port policy – the privatization of port infrastructure, with a particular focus on international experience and the Ukrainian context. It is argued that full privatization of strategic assets in the water transport sector is not the dominant global practice, but rather an exception. Most leading countries retain state ownership over critical port facilities while engaging private capital through concession agreements, leases, or public-private partnerships. The analysis covers practices in Singapore, China, the United Arab Emirates, the European Union, as well as problematic cases in Australia and Latin America. The article examines Ukraine's experience with port concessions in Kherson and Olvia, along with the country's first-ever port privatization cases – Ust-Dunaisk and Bilhorod-Dnistrovskiy. These cases revealed both the potential benefits and challenges of port sector reform. In this context, the article emphasizes the need for systematic implementation of effective control and risk mitigation mechanisms

to ensure a balanced integration of private investment and the safeguarding of strategic national interests. The core risks associated with port privatization are identified, including market monopolization, loss of strategic control, deterioration of social standards, and threats to national security – particularly in wartime conditions. To counter these risks, the article proposes: retaining public ownership of land and hydraulic structures; implementing effective antitrust regulations; and legally binding private operators to fulfill social, investment, and environmental commitments. It argues that strategic state involvement in the port sector is not an anachronism but a modern and effective response to the challenges of geoeconomics, transport security, and critical infrastructure protection. The article concludes that combining state control models with flexible instruments for attracting private capital offers a viable approach to achieving a balance between economic efficiency, social responsibility, and strategic security.

Key words: water transport, transport hub, port, port terminal, port sector, port infrastructure, transport infrastructure, port privatization, concession, public-private partnership, state ownership, transport security, national security, investment mechanisms, port management, port governance.

Дата надходження статті: 06.07.2025

Дата прийняття статті: 28.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

Рибін А.В.

Український державний університет залізничного транспорту

Мурад'ян А.О.

Одеський національний морський університет

Волошин І.О.

Одеський національний морський університет

АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА З ОБШИВКОЮ, УТВОРЕНОЮ ПРЯМОКУТНИМИ ГОФРАМИ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗАЛІЗНИЧНИМ ПОРОМОМ

В статті висвітлено результати аналізу міцності кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом. Для забезпечення міцності обшивки стін кузова напіввагона запропоновано їх виготовлення з прямокутними гофрами. За рахунок того, що лист з такою конфігурацією гофр має більший момент опору ніж лист обшивки типової конструкції кузова, прогнозується покращення міцності обшивки.

Для дослідження міцності кузова напіввагона проведено його розрахунок при перевезенні залізничним поромом за умови бортової хитами. Даний режим експлуатації прийнято до уваги у зв'язку з тим, що при цьому має місце більша навантаженість конструкції кузова, ніж при експлуатації на магістральних коліях. Визначення динамічних навантажень, що діють на кузов вагона здійснено шляхом математичного моделювання його навантаженості. Розв'язок математичної моделі здійснено за методом Рунге – Кутти. Отримана величина прискорення, як складова динамічного навантаження, врахована при розрахунках на міцність кузова. Просторову модель кузова створено у програмному комплексі SolidWorks. Розрахунок на міцність реалізовано у SolidWorks Simulation за методом скінчених елементів. У якості розрахункового критерію обрано критерій Мізеса. Скінчено-елементну модель сформовано ізопараметричними тетраедрами. Результати розрахунків встановили, що напруження в кузові напіввагона не перевищують допустимих значень. При цьому в обшивці бокових стін максимальні напруження на 14,5% нижчі ніж у обшивці типового виконання.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів із покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: залізничний транспорт, напіввагон, несуча конструкція напіввагона, обшивка із прямокутних гофр, міцність кузова, залізнично-поромні перевезення.

Постановка проблеми. Забезпечення сталого розвитку залізничної галузі викликає необхідність впровадження в експлуатацію рухомого складу з покращеними техніко-економічними показниками. Вже тривалий час напіввагони є одними з найбільш поширених типів вагонів у експлуатації. Однак вони є і одними із найбільш пошкоджуваних типів вагонів. При цьому значна кількість пошкоджень в експлуатації припадає на обшивку їх кузовів. Типова обшивка кузова напіввагона

утворена металевими листами-виштамповками, які мають змінну за висотою товщину: за висотою 1/3 від нижнього об'язування обшивка має товщину 5 мм, а 2/3 від верхнього об'язування – 3 мм.

Найбільш частими пошкодженнями обшивки є деформації та розрив. Ці пошкодження обумовлені експлуатаційними навантаженнями, які діють на кузов вагона з вантажем під час руху у складі поїзда або під час вантажно-розвантажувальних робіт.

Наявність пошкоджень обшивки викликає не тільки необхідність здійснення позапланових видів ремонту вагонів, а і необхідність додаткових витрат на їх утримання в експлуатації. Тому виникає необхідність впровадження рішень, спрямованих на покращення міцності обшивки напіввагонів в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для виявлення сучасного стану питання забезпечення міцності обшивки кузовів напіввагонів у експлуатації проведено аналіз наявних наукових публікацій. Наприклад, в публікації [1] для зменшення пошкоджень обшивки стін напіввагона пропонується зміна геометрії нижньої частини листа. Наведено обґрунтування даного рішення результатами розрахунків на міцність кузова напіввагона. Однак при цьому авторами не запропоновано рішень щодо забезпечення міцності цілого листа обшивки, лише найбільш навантаженої його частини.

В роботі [2] покращення міцності обшивки кузова напіввагона досягається шляхом використання сендвіч-панелей. Вони містять енергопоглинальний матеріал, який сприяє зменшенню динамічних навантажень, що діють на стіни кузова і за рахунок цього зменшуються напруження, що виникають в бокових стінах. Разом із цим, таке рішення є досить вартісним. Це обмежує його впровадження у серійне виробництво.

Подібне рішення запропоновано в роботі [3], де також розглядається доцільність впровадження сендвіч-панелей у якості обшивки бокових стін напіввагона. Однак автори запропонували дане рішення з позиції покращення технічного обслуговування та ремонту вагона. В роботі відсутні результати міцнісного аналізу кузова з обшивкою із сендвіч-панелей.

В роботі [4] проводиться дослідження міцності кузова напіввагона з удосконаленою обшивкою торцевих стін. При цьому пропонується посилювати їх нижню частину, за висотою $1/3$ від нижнього обв'язування, горизонтальними гофрами. Наведено результати розрахунку на міцність кузова напіввагона із урахуванням такого удосконалення. Але дане рішення сприяє зменшенню навантаженості лише нижньої частини листа.

Шляхи удосконалень конструкцій вантажних вагонів висвітлено авторами статті [5]. З цієї метою проведено аналіз великого масиву наукових публікацій за даним питанням. Це дозволило виявити перспективні напрямки удосконалень їх конструкцій, в тому числі, кузовів. Однак при цьому не запропоновано рішень, щодо можливого

покращення міцності бокових стін кузовів напіввагонів.

Для покращення міцності стін кузова напіввагона в публікації [6] пропонується використання магнієвих та композитних сплавів для їх виготовлення. Наведено перспективи застосування таких матеріалів. Визначено проблеми застосування цих матеріалів на сучасному етапі розвитку залізничної галузі. Однак дана робота є оглядовою і в ній відсутні результати відповідних розрахунків на міцність кузова з зазначених матеріалів при експлуатаційних режимах навантажень.

В роботі [7] також пропонується впровадження перспективних матеріалів для виготовлення обшивки стін кузова вагона. При цьому прогнозується зменшення тари вагона в цілому. Наведено можливі варіанти створення такого кузова вагона, але дане впровадження є досить вартісним. Крім того, воно потребує налагодження відповідної бази щодо технічного обслуговування та ремонту вагона.

Аналіз наукових публікацій [1–7] дозволяє зробити висновок, що удосконалення обшивки кузовів напіввагонів є актуальною задачею, яка потребує подальшого розвитку та дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення міцності кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом. Це сприятиме зменшенню пошкоджень кузовів напіввагонів в експлуатації та витрат на їх утримання. Для досягнення зазначеної мети сформульовано такі завдання:

- провести дослідження динамічної навантаженості кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом;
- провести розрахунок на міцність кузова напіввагона.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення міцності обшивки стін кузова напіввагона запропоновано їх виготовлення з прямокутними гофрами (рис. 1). За рахунок того, що лист з такою конфігурацією гофр має більший момент опору ніж лист обшивки типової конструкції кузова, прогнозується покращення міцності обшивки. Товщина листа за умови забезпечення мінімальної матеріалоемності та забезпечення міцності повинна складати 1,8 мм. Маса такого листа дорівнює 67,26 кг. Це на 10,5% нижче за масу типового листа обшивки кузова. Кузов вагона адаптовано до перевезень на залізничному поромі. Для цього він оснащений вузлами для закріплення, які розміщуються на шворневих балках (рис. 1).

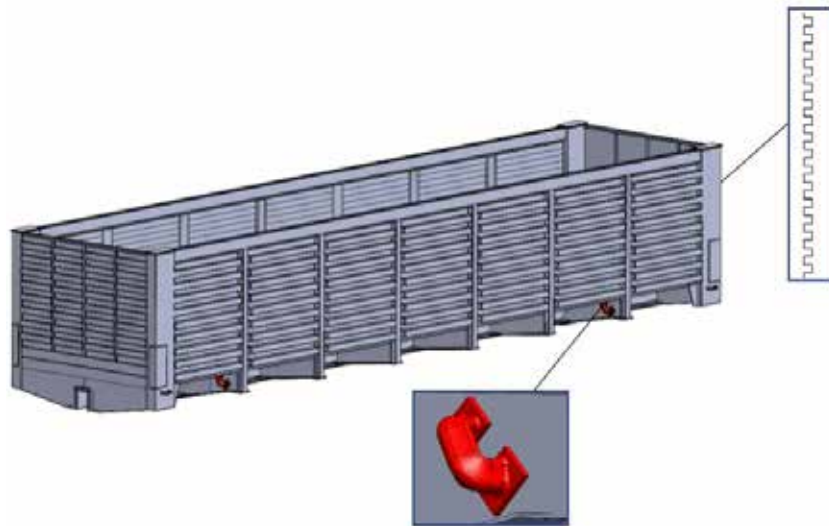


Рис. 1. Кузов напіввагона з обшивкою із листів, утворених прямокутними гофрами

Для дослідження міцності кузова напіввагона з обшивкою із листів, утворених прямокутними гофрами проведено його розрахунок при перевезенні залізничним поромом. Даний режим експлуатації прийнято до уваги у зв'язку із тим, що при цьому має місце більша навантаженість конструкції кузова, ніж при експлуатації на магістральних коліях. До уваги прийнято бортову хитавицю залізничного порому.

Визначення динамічних навантажень, які діють на кузов вагона при перевезенні залізничним поромом здійснено із використанням математичної моделі, сформованої у попередніх роботах авторів [8]:

$$\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q} + \left(\Lambda_0 \cdot \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right) \dot{q} = \left((p' + F(t)) \cdot \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right), \quad (1)$$

де D – водовитіснення залізничного порому; B – ширина корпусу залізничного порому; h – висота борта залізничного порому; Λ_0 – коефіцієнт, який характеризує опір коливанням залізничного порому; z_g – координата центру ваги залізничного порому; p' – навантаження від вітру на надводну проекцію залізничного порому; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збудує рух залізничного порому.

При цьому враховано, що вагон не має власного ступеня вільності та здійснює переміщення разом із залізничним поромом, тобто повторює його траєкторію переміщень.

Закон дії збудуючого зусилля завдано за троходією. Розрахунок проведено на прикладі порому типу «Герой Плевни» для акваторії Чорного моря. Розв'язок математичної моделі (1) здійснено за методом Рунге – Кутта при початкових умовах, рівних нулю. Встановлено, що максимальне при-

скорення, яке діє на несучу конструкцію напіввагона, що розміщений на крайній від фальшборта колії верхньої палуби залізничного порому складає 0,21g. Дана величина прискорення приведена із урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння, яке розраховано для кута крену 12,2°. Зазначений кут крену розраховано для випадку статичної дії вітру на бокову проекцію залізничного порому.

Визначене прискорення враховано при розрахунку на міцність кузова напіввагона. Просторову модель кузова створено у програмному комплексі SolidWorks [9]. Розрахунок на міцність реалізовано у SolidWorks Simulation за методом скінченних елементів. При цьому використано критерій Мізеса [10].

Розрахункову модель кузова наведено на рис. 2. Модель враховує, що на несучу конструкцію кузова діє вертикальне навантаження P_g . На стіни діє тиск від навалювального вантажу P_m . До вузлів закріплення ланцюгових стяжок прикладалась сила P_{cm} .

Тиск від насипного вантажу (кам'яне вугілля) розраховано за формулою [8]:

$$p = \gamma \cdot h' \frac{\cos^2(\rho + \alpha)}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin \rho \cdot \sin(\rho \pm \alpha)}{\cos \alpha}} \right]^2} \cos \alpha, \quad (2)$$

де γ – об'ємна маса вантажу; h' – висота кузова напіввагону; ρ – кут внутрішнього тертя; α – кут нахилу напіввагона відносно повздовжньої осі.

В цій формулі знак “+” враховано при визначенні тиску на стіну з боку нахилу кузова, а “–” – з протилежного боку.

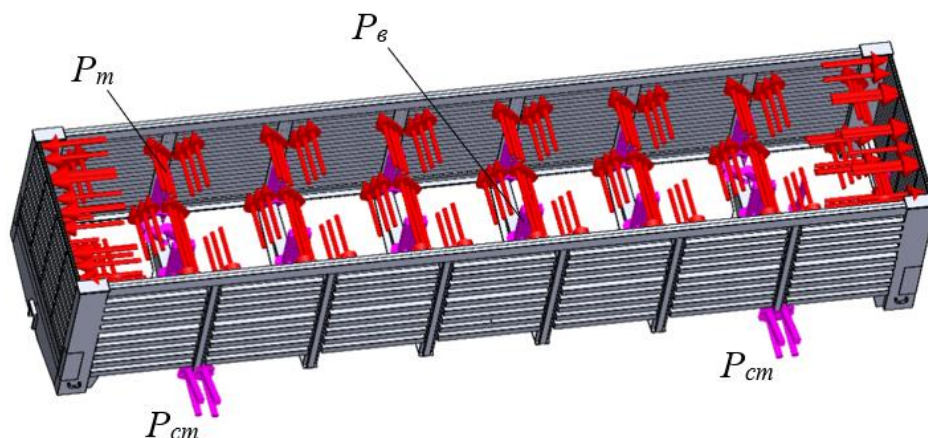


Рис. 2. Розрахункова схема кузова напіввагона

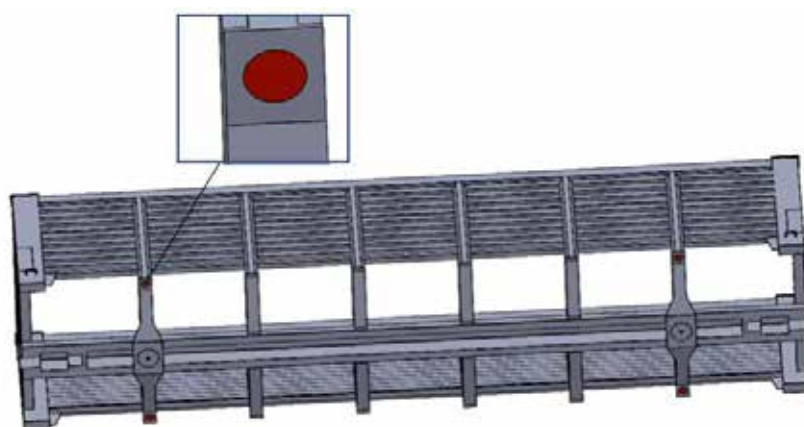


Рис. 3. Зони закріплення кузова на шворневих балках

При створенні скінчено-елементної моделі кузова використано тетраедри з максимальним розміром 40 мм та мінімальним 8 мм. Модель налічує 2002145 елементів та 3635686 вузлів. Закріплення моделі відбувалось в зонах обпирання кузова на візки, а також за кінцеві частини шворневих балок. Така схема обпирання обрана у зв'язку із тим, що при перевезенні вагонів на залізничних поромках під шворневі балки встановлюються механічні упор-домкрати, які розвантажують ресорне підвищення візка вагона при його перевезенні морем. Тому на кінцевих частинах шворневих балок встановлювались накладки, які за геометрією повторюють поверхню взаємодії упор-домкратів із ними (рис. 3). Матеріал конструкції – сталь 09Г2С з межею міцності 345 МПа.

На підставі проведених розрахунків отримано результати, наведені на рис. 4–6. Отже найбільш навантаженими зонами кузова є шворневі балки, а саме, зони їх взаємодії із вузлами для закріплення ланцюгових стяжок (рис. 4).

Максимальні напруження при цьому виникають у вузлах для закріплення вагона на палубі і складають 306,4 МПа (рис. 5), що нижче на 1,5% за допустимі. У якості допустимих прийнято напруження, які дорівнюють 310,5 МПа [11]. Тобто допустимі напруження прийнято рівними тим, що встановлені для I розрахункового режиму. В дійсності, розглянутий режим є наднормованим, тому питання встановлення допустимих напружень при заданій схемі навантаження кузова, будуть подальшим розвитком даного дослідження.

Максимальні переміщення в кузові зафіксовано у його верхньому об'язуванні з боку нахилу і складають близько 5,5 мм (рис. 6). Така дислокація полів переміщень пояснюється схемою навантаження кузова.

Подальшим розвитком даного дослідження є питання втомної міцності кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами. Також потребує дослідження аналіз міцності торцевої стіни кузова, яка також утворена такою



Рис. 4. Найбільш навантажені зони кузова напіввагона

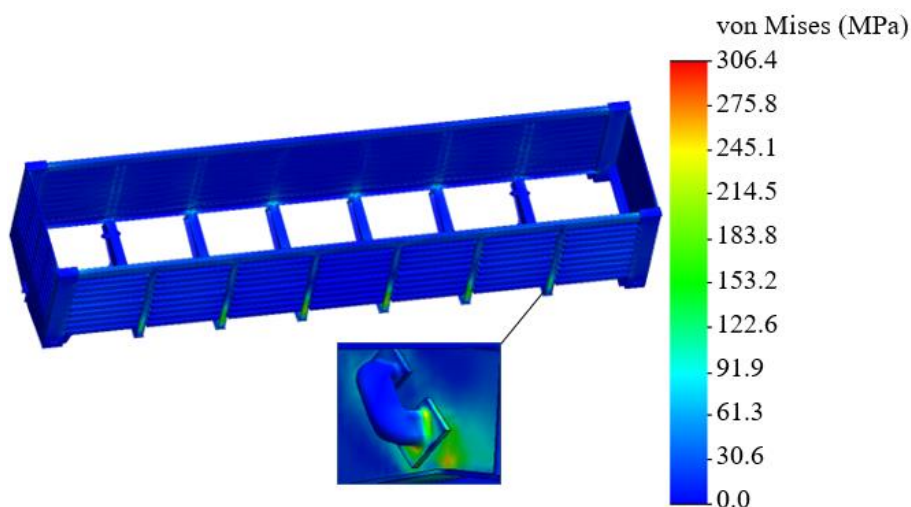


Рис. 5. Напружений стан кузова напіввагона

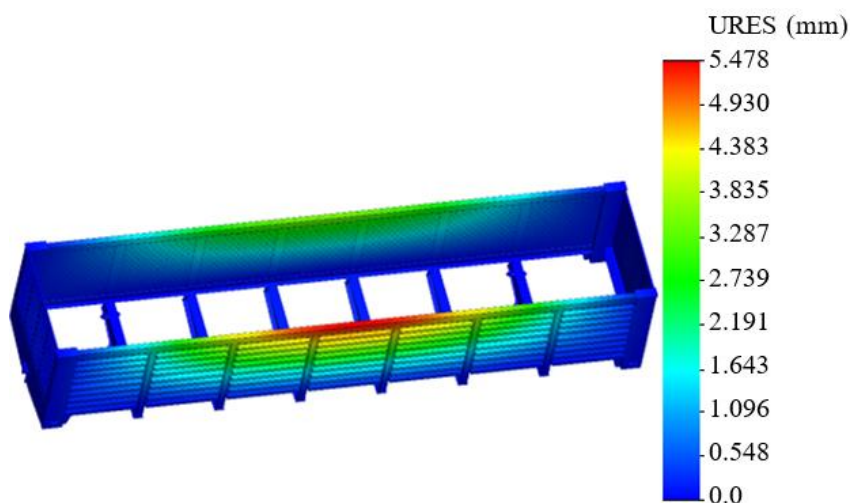


Рис. 6. Переміщення в вузлах кузова напіввагона

обшивкою. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів із покращеними техніко-економічними показниками.

Висновки. 1. Проведено дослідження динамічної навантаженості кузова напіввагона з обшивкою, утвореною прямокутними гофрами при перевезенні залізничним поромом. Встанов-

лено, що максимальне прискорення, яке діє на несучу конструкцію напіввагона, що розміщений на крайній від фальшборта колії верхньої палуби залізничного порому складає 0,21g. Зазначена величина прискорення приведена із урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння, яке розраховано для кута крену 12,2°.

2. Проведено розрахунок на міцність кузова напіввагона. Максимальні напруження, зафіксо-

вані в кузові, виникають у вузлах для закріплення на палубі і складають близько 306 МПа. Ці напруження не перевищують допустимі та є нижчими за них на 1,5%. В обшивці бокових стін максимальні напруження склали близько 194 МПа, що на 14,5% нижче ніж у обшивці типового виконання.

Максимальні переміщення в кузові зафіксовано у його верхньому обв'язуванні з боку нахилу і складають близько 5,5 мм.

Список літератури:

1. Vatulia Glib, Lovska Alyona, Myamlin Sergiy, Rybin Andriy, Nerubatskyi Volodymyr, Hordiienko Denys. Determining patterns in loading the body of a gondola with side wall cladding made from corrugated sheets under operating modes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 2/7 (122). P. 9–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.275547
2. Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Dizo J. A study of the transverse loading of an open wagon body with sandwich-panel walls. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 66–73. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.011
3. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 161. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012107.
4. Ловська А. О. Дослідження міцності кузова напіввагона з удосконаленою обшивкою торцевих стін. *Розвиток транспорту*. 2023. № 2(17). С. 7–15. DOI: 10.33082/td.2023.2-17.01
5. Sulym Andrii, Safronov Oleksandr, Strynzhna Andrii, Khozia Pavlo. Ways of improving of freight car design. *Transport systems and technologies*. 2024. Vol. (43). P. 47–60. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-4
6. Paul Thomas, Chin Wei Lai, Mohd Rafie Johan. Prospective of Magnesium and Alloy-based Composites for Lightweight Railway Rolling Stocks. *Applied Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 15. No. 2. 5716. P. 1–10. DOI: 10.14416/j.asep.2022.02.006
7. Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 232. Issue 1. P. 25–42.
8. 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. DOI: 10.3390/s24010183
9. Пустульга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навч. посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.
10. Golovanevskiy V., Kondratiev A. Elastic Properties of Steel-Cord Rubber Conveyor Belt. *Experimental Techniques*. 2021. Vol. 45, Iss. 2. P. 217–226. DOI: 10.1007/s40799-021-00439-3
11. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.

Lovska A.O., Rybin A.V., Muradian A.O., Voloshyn I.O. ANALYSIS OF THE STRENGTH OF AN OPEN WAGON BODY WITH A LINING FORMED BY RECTANGULAR CORRUGATIONS DURING TRANSPORTATION BY RAIL FERRY

The article highlights the results of the analysis of the strength of the open wagon body with a lining formed by rectangular corrugations during transportation by rail ferry. To ensure the strength of the open wagon body wall lining, it is proposed to manufacture them with rectangular corrugations. Due to the fact that a sheet with such a configuration of corrugations has a greater moment of resistance than a sheet of lining of a typical body design, an improvement in the strength of the lining is predicted.

To study the strength of the open wagon body, its calculation was carried out during transportation by rail ferry under the condition of side sway. This operating mode was taken into account due to the fact that in this case the body structure is loaded more heavily than during operation on main tracks. Determination of dynamic loads acting on the open wagon body was carried out by mathematical modeling of its loading. The mathematical model was solved using the Runge-Kutta method. The obtained acceleration value, as a component of the dynamic load, was taken into account in the calculations of the strength of the body. The spatial model of the body was created in the SolidWorks software package. The strength calculation was implemented in SolidWorks Simulation using the finite element method. The Mises criterion was chosen as the calculation criterion. The finite element model was formed by isoparametric tetrahedra. The results of the calculations established that the stresses in the open wagon body do not exceed the permissible values.

At the same time, the maximum stresses in the side wall cladding are 14.5% lower than in the cladding of the typical design.

The conducted research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern freight wagon structures with improved technical and economic indicators.

Key words: *railway transport, open wagon, supporting structure of open wagon, cladding made of rectangular corrugations, body strength, rail-ferry transportation.*

Дата надходження статті: 07.07.2025

Дата прийняття статті: 15.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

УДК 656.6:616-036
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/40>

Онищенко С.П.

Одеський національний морський університет

Мельник О.М.

Одеський національний морський університет

Бондаренко Ю.А.

Компанія «Оскар», Одеса

Присяжнюк А.М.

Одеський національний морський університет

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СУДЕН-КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ НА ЛІНІЇ З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ

Метою даного дослідження є розробка теоретичних положень щодо оцінки ефективності роботи суден-контейнеровозів на лініях з урахуванням невизначеності контейнеропотоків, що дозволить забезпечити обґрунтованість рішень у системі управління роботою флоту судноплавних компаній, завдяки врахуванню реальних умов їх експлуатації.

Запропоновано формулу тайм-чартерного еквіваленту для судна-контейнеровозу на лінії, яка враховує ймовірнісну природу обсягів перевезень, як похідну від невизначеності контейнеропотоків. Визначено послідовність та сутність етапів процесу прогнозування обсягів перевезень між портами лінії для певного судна з урахуванням невизначеності контейнеропотоків. Оцінка контейнеропотоків та відповідних обсягів роботи суден передбачає розгляд трьох прогнозних значень – оптимістичного, песимістичного та більш ймовірного (середнього), що формується з урахуванням математичного опису невизначеності контейнеропотоків на оперативному та стратегічному рівнях управління. Сформульовані вирази тайм-чартерного еквіваленту судна-контейнеровоза для трьох варіантів обсягів перевезень – очікуваного, оптимістичного та песимістичного для кожного рівня управління з урахуванням специфіки врахування невизначеності, а також переходу від обсягу роботи компанії на лінії до обсягу роботи кожного судна на даній лінії, що встановлюється за допомогою коефіцієнтів, які відображають частку контейнеромісткості судна у загальній контейнеромісткості суден, що працюють на лінії. Дана формула дозволяє оцінювати перспективну ефективність роботи суден-контейнеровозів для своєчасного корегування лінійного сервісу – розміру судна, портів лінії, перш за все. Порівняння прогнозованої ефективності з фактичною також надаватиме додаткову інформацію для осіб, які приймають рішення щодо управління роботою флоту та функціонування лінійного сервісу.

Ключові слова: контейнерні перевезення, морський транспорт, вантажні перевезення, організація, транспортні послуги, ефективність, лінійний сервіс, тайм-чартерний еквівалент, невизначеність, ймовірність, обсяги перевезень, контейнеропотоки.

Постановка проблеми. Індустрія сучасного судноплавства стикається зі складним середовищем, що характеризується нерівномірною та незбалансованою потужністю в різних сегментах. Геополітичні фактори, зміни маршрутів руху суден, старіння флоту, відносно помірний портфель замовлень на судна, суднобудівні обмеження, основна надлишкова місткість контей-

неровозів і реструктуризація на ринку лінійних перевезень [1] є факторами, які визначають перспективи судноплавної галузі взагалі та контейнерного сектора, зокрема. Стійкою залишається тенденція зростання розміру суден-контейнеровозів, що спостерігається останні роки як результат прагнення судновласників досягти та підвищити ефект масштабу. Це призводить до змін у порто-

вому обслуговуванню – модернізації інфраструктури, наприклад, та впровадження нового обладнання; поглиблення підхідних каналів та глибин біля причалів [2]. Екологічні ініціативи на світовому рівні обумовлюють впровадження заходів, які сприяють зменшенню впливу контейнерних перевезень на навколишнє середовище, у тому числі, впроваджуються більш чисті види палива, підвищується енергоефективність та досліджуються альтернативні технології двигунів [3]. Перерозподіл у світовій торгівлі обґрунтовує корегування існуючих глобальних логістичних систем. Це впливає на пошук компаніями-перевізниками нових маршрутів [4] та відкриття нових сервісів у відповідності до нових структур ланцюгів постачань, що формує специфіку ринку морських контейнерних перевезень у перспективі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контейнерні перевезення у широкому сенсі та питання організації доставки вантажів у контейнерах є предметом багатьох сучасних досліджень. Різні аспекти контейнерних перевезень – організаційні, економічні, екологічні, технологічні – розглядаються у публікаціях [4–11]. З урахуванням значимості контейнерних перевезень для світовою торгівлі, звичайно, питанням, пов'язаним з роботою суден, у тому числі, на контейнерних ліній, присвячено достатню кількість публікацій. Слід зазначити, що більшість сучасних публікацій відповідають на нові виклики судноплавства та пов'язано з ними у тому чи іншому сенсі. Сучасні тенденції у судноплаванні, які впливають на ефективність роботи суден будь-якої спеціалізації, полягають у контролі та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище, переходу на нові стандарти технічної експлуатації [11, 12], використання нових видів палива [3]. Отже, більшість сучасних публікацій спрямовано на вирішення проблеми знаходження балансу між економічною ефективністю та енергоефективністю, але ж у більшості робіт більшу увагу приділено саме енергоефективності без врахування у необхідному обсязі економічного підґрунтя. Крім того, тенденція автоматизації та цифровізації морських перевезень обґрунтовує нову реальність для усіх учасників процесу доставки вантажів у контейнерах [10], у тому числі, обумовлює новий режим роботи контейнерних терміналів при обслуговуванні суден-контейнеровозів [2], це надає можливості прискорити час перебування суден у портах та впливає на формування розкладу роботи суден.

У [8] структуровано і формалізовано вплив зовнішнього середовища на стан системи фідерних

ліній, для оцінки доцільності організації роботи суден-контейнеровозів в певному регіоні; а також встановлено і формалізовано взаємозв'язок системи фідерних ліній та системи магістральних ліній за параметрами: обсяги контейнеропотоків, контейнеромісткість суден та частка її розподілу за портами. З урахуванням особливостей функціонування лінійного контейнерного сервісу, а саме, наявності стійкого розкладу, за яким працюють судна, значна частка сучасних публікацій присвячено саме питанням розкладу, наприклад [13, 14], у тому числі, впливу невизначеності на розклад роботи суден [13]. Особливу увагу у сучасних роботах присвячено невизначеності у вигляді погодних умов на рейс судна, маршрут його руху та ефективність, наприклад, у роботах [4, 15, 16]. Проте дані роботи орієнтовані на балкерні та універсальні судна при роботі у трамповій секції судноплавства, отже вони можуть використовуватися для лінійного судноплавства з урахуванням його особливостей з точки зору роботи суден, перш за все. Ймовірнісна природа умов реалізації транспортного процесу [4], обумовлює окремий напрямок досліджень впливу невизначеності на параметри виробничого процесу суден [15]. Що стосується невизначеності контейнеропотоків, то це питання розглядається відносно до роботи контейнерних терміналів (наприклад, [4, 5]), але ж як вантажна база суден-контейнеровозів дані питання майже не розглядаються у наукових публікаціях. Таким чином, можна стверджувати, що вплив невизначеності на роботу суден є предметом сучасних досліджень, але ж майже відсутні дослідження природи невизначеності контейнеропотоків та її впливу на ефективність роботи суден на контейнерних лініях.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка теоретичних положень щодо оцінки ефективності роботи суден-контейнеровозів на лініях з урахуванням невизначеності контейнеропотоків, що дозволить забезпечити обґрунтованість рішень у системі управління роботою флоту судноплавних компаній, завдяки врахуванню реальних умов їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Основним показником ефективності роботи судна є тайм-чартерний еквівалент, який описується наступною формулою [16]:

$$TCE = \frac{F - R_{зм}}{T_p} = \frac{F - (R_{порт} + R_{кан} + R_{бунк})}{T_p}, \quad (1)$$

де F (дол) – сума фрахту, яка традиційно для трампового судноплавства визначається як

$F = f \cdot Q$, f – фрахтова ставка (дол/т); Q – кількість вантажу (т); T_p – тривалість рейсу (дб); $R_{зм}$ – змінні витрати (дол), які складаються з портових зборів та платень $R_{порт}$ (дол), вартості проходжень каналів та проливів $R_{кан}$ (дол), вартості бункеру $R_{бунк}$ (дол).

Для суден контейнеровозів сума фрахту F формується з урахуванням структури перевезень на лінії та відповідних ставок перевезення:

$$F_{n\gamma} = \sum_{l=1}^{v_n} \sum_{k=1}^{v_n} f_{lk}^n \cdot Q_{lk}^{n\gamma}, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, \quad (2)$$

де f_{lk}^n – ставки на перевезення (дол/TEU) між портами лінії $n = \overline{1, N}$; $Q_{lk}^{n\gamma}$ – відповідна кількість вантажу (TEU), яка перевезена судном $\gamma = \overline{1, \gamma_n}$ на лінії $n = \overline{1, N}$ (обсяги перевезень) між портами $l, k = \overline{1, v_n}, l \neq k$.

Тривалість рейсу T_p у даному випадку – це транзитний час $T_{n\gamma}^p, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, n = \overline{1, N}$, який для певного судна є умовно постійним з урахуванням існуючого розкладу. Тривалість рейсу (транзитний час) складається з двох складових – часу ходового $T_{n\gamma}^v$ та часу стоянкового $T_{n\gamma}^p$, отже:

$$T_p = T_{n\gamma}^v + T_{n\gamma}^p. \quad (3)$$

Наступні системи параметрів характеризують судна, порти та маршрути ліній [6]:

власні судна компанії-перевізника $S_{n\gamma} = \langle K_{n\gamma}, NT_{n\gamma}, BT_{n\gamma}, r_{n\gamma}, r_{n\gamma}^{bunk_v}, r_{n\gamma}^{bunk_p} \rangle, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}$, де $K_{n\gamma}$ – контейнеромісткість судна, TEU; $NT_{n\gamma}$, $BT_{n\gamma}$ – відповідно, нетто- та брутто-тоннаж судна, які визначають важливу складову витрат по судну – портові збори та плати, а також вартість проходження каналів та протоки; $r_{n\gamma}$ – норматив постійних витрат по судну, дол/доб; $r_{n\gamma}^{bunk_v}$ – витрати палива на ходу (для усередненої швидкості), т/доб; $r_{n\gamma}^{bunk_p}$ – витрати палива на стоянці, т/доб;

орендовані у тайм-чартер судна:

$S_{n\gamma} = \langle f_{n\gamma}^{t-ch}, NT_{n\gamma}, BT_{n\gamma}, r_{n\gamma}, r_{n\gamma}^{bunk_v}, r_{n\gamma}^{bunk_p} \rangle, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}$, де $f_{n\gamma}^{t-ch}$ – ставка тайм-чартерної оренди судна;

порти: $\Pi_{nk} = \langle r_{nk}^{port\_NT}, r_{nk}^{port\_BT} \rangle, k = \overline{1, v_n}, n = \overline{1, N}$, де $r_{nk}^{port\_NT}, r_{nk}^{port\_BT}, r_{nk}^{port}$, які відображають вартість перебування судна в порту для 1 NT і 1 BT, відповідно, оскільки, як правило, портові збори та плати нараховуються саме на NT і BT судна);

канали та протоки: $H_{ng} = \langle h_{ng}^{NT}, h_{ng}^{BT} \rangle, g = \overline{1, \psi_n}, n = \overline{1, N}$, де h_{ng}^{NT}, h_{ng}^{BT} характеризують вартість для 1 NT та 1 BT проходження судном каналу або протоки (або іншого інфраструктурного об'єкта на маршруті).

Вираз тайм-чартерного еквіваленту для певного судна на певній лінії має наступний вигляд:

$$TCE_{n\gamma} = \frac{\sum_{l=1}^{v_n} \sum_{k=1}^{v_n} f_{lk}^n \cdot Q_{lk}^{n\gamma} - \left(\sum_{l=1}^{v_n} R_{n\gamma l}^{norm} \right) + R_{n\gamma}^{кан} + R_{n\gamma}^{бунк}}{T_{n\gamma}}, \quad (4)$$

де $\sum_{l=1}^{v_n} R_{n\gamma l}^{norm}$ – портові витрати, $R_{n\gamma}^{кан}, R_{n\gamma}^{бунк}$ – вартості проходження каналів/проток та витрати на бункер.

Складові змінних витрат формуються наступним чином:

$$\sum_{l=1}^{v_n} R_{n\gamma l}^{norm} = \left(\sum_{l=1}^{v_n} r_{nl}^{port\_NT} \right) \cdot NT_{n\gamma} + \left(\sum_{l=1}^{v_n} r_{nl}^{port\_BT} \right) \cdot BT_{n\gamma}, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, \quad (5)$$

$$R_{n\gamma}^{бунк} = r_{n\gamma}^{bunk_v} \cdot T_{n\gamma}^v + r_{n\gamma}^{bunk_p} \cdot T_{n\gamma}^p, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, \quad (6)$$

$$R_{n\gamma}^{кан} = \sum_{g=1}^{\psi_n} (h_{ng}^{NT} \cdot NT_{n\gamma} + h_{ng}^{BT} \cdot BT_{n\gamma}), n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}. \quad (7)$$

Отже, вираз тайм-чартерного еквіваленту (4) для суден-контейнеровозів дозволяє оцінювати економічну ефективність їх роботи на лініях.

Планування роботи суден та оцінка ефективності передбачають використання прогнозних значень у виразі тайм-чартерного еквіваленту, у тому числі, ймовірнісних оцінок. Слід зазначити, що для суден-балкерів, які працюють у трамповій секції судноплавства, у дослідженнях [16] надані формули тайм-чартерного еквіваленту, які враховують невизначеність на двох рівнях – на оперативному та стратегічному. Тем не менш, робота суден-балкерів має певну специфіку, тому основними ймовірнісними характеристиками в рамках певного рейсу є часові параметри, перш за все. Для стратегічного рівня ймовірнісними характеристиками є фрахтові ставки, вартість бункеру, кількість рейсів. На відміну від цієї ситуації, судна-контейнеровози працюють при умовно постійному часу рейсів у відповідності до розкладу на обох рівнях управління – оперативному та стратегічному. Фрахтова ставка схильна до змін в рамках стратегічного розгляду. Але ж головним фактором, якій має цілком ймовірнісну природу, є кількість контейнерів, яка надана для перевезення між певними портами та яка формується на базі оцінок контейнеропотоків.

Підсумовуючи вищезгадані особливості роботи суден-контейнеровозів, формуємо наступний перелік ймовірнісних складових виразу тайм-чартерного еквіваленту (4). На оперативному рівні:

• $Q_{lk}^{n\gamma}$ – кількість вантажу (TEU), яка перевезена судном $\gamma = \overline{1, \gamma_n}$ на лінії $n = \overline{1, N}$ між портами $l, k = \overline{1, v_n}, l \neq k$;

на стратегічному рівні:

• $Q_{lk}^{n\gamma}$ – кількість вантажу (TEU), яка перевезена судном $\gamma = \overline{1, \gamma_n}$ на лінії $n = \overline{1, N}$ між портами $l, k = \overline{1, v_n}, l \neq k$; f_{lk}^n – ставки на перевезення (дол./TEU) між портами $l, k = \overline{1, v_n}, l \neq k$ лінії $n = \overline{1, N}$.

Інші складові формули (4) можуть вважатися детермінованими, тому що навіть при підвищенні вартості бункеру або вартості проходження судном каналу, або заходу в порт, прийнята у даному секторі судноплавства система надбавок до фрахтової ставки враховує вказані зміни. Таким чином, на оперативному рівні прогнозована оцінка тайм-чартерного еквіваленту формується з трьох значень: одне відповідає «оптимістичному» варіанту, інше – «песимістичному», а третє є варіантом, заснованим на середньому значенні контейнеропотоків, його можна визначити як «очікуваний».

Отже, для оцінки ефективності роботи суден на оперативному рівні пропонуються наступні формули:

$$TCE_{n\gamma}' = \frac{\sum_{l=1}^{v_n} \sum_{k=1, k \neq l}^{v_n} f_{lk}^n \cdot Q_{lk}^{n\gamma} - \left(\left(\sum_{l=1}^{v_n} R_{n\gamma l}^{norm} \right) + R_{n\gamma}^{кан} + R_{n\gamma}^{бунк} \right)}{T_{n\gamma}}, \quad (8)$$

$$TCE_{n\gamma}'' = \frac{\sum_{l=1}^{v_n} \sum_{k=1, k \neq l}^{v_n} f_{lk}^n \cdot Q_{lk}^{m\gamma} - \left(\left(\sum_{l=1}^{v_n} R_{n\gamma l}^{norm} \right) + R_{n\gamma}^{кан} + R_{n\gamma}^{бунк} \right)}{T_{n\gamma}},$$

$$\gamma = \overline{1, \gamma_n}, n = \overline{1, N} \quad (9)$$

де $Q_{lk}^{n\gamma}, Q_{lk}^{m\gamma}$, відповідно, оптимістичний та песимістичний варіанти обсягів перевезень між портами лінії; $TCE_{n\gamma}', TCE_{n\gamma}''$ відповідно, оптимістичне та песимістичне значення ефективності роботи судна. Очікуване значення $TCE_{n\gamma}$ враховує математичне очікування обсягів перевезень.

Формули (4), (8), (9) можуть бути використані для оцінки ефективності роботи суден-контейнеровозів. З урахуванням того, що у центрі уваги даного дослідження саме невизначеність контейнеропотоків, тому ймовірісна природа фрахтової ставки не розглядається.

Для оцінки оптимістичного та песимістичного варіантів контейнеропотоків на оперативному рівні управління використовуємо підхід, який наведено у [4], заснований на властивостях нормального закону розподілу, отримаємо наступне:

$$Q_{lk}^{n\gamma} = \overline{Q}_{lk}^n + \lambda \cdot \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}} \text{ та } Q_{lk}^{m\gamma} = \overline{Q}_{lk}^n - 2 \cdot \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}}, \quad (10)$$

де λ – коефіцієнт, який приймається базуючись на властивостях нормального закону розподілу: $\lambda = 2$ або $\lambda = 3$. Згідно правила «трьох сигм» з імовірністю 0,9972 значення нормальної випадкової величини знаходяться у межах $\pm 3\sigma$ від середнього значення, з ймовірністю 0,9544 у межах $\pm 2\sigma$ від середнього значення. Таким чином, в якості значень песимістичного $Q_{lk}^{m\gamma}$ та оптимістичного $Q_{lk}^{n\gamma}$ обсягів перевезень приймаємо відповідно:

$$\overline{Q}_{lk}^{n\gamma} + 2 \cdot \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}} \text{ та } \overline{Q}_{lk}^{n\gamma} - 2 \cdot \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}}$$

$$\text{або } \overline{Q}_{lk}^{n\gamma} + 3 \cdot \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}} \text{ та } \overline{Q}_{lk}^{n\gamma} - 3 \cdot \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}} \quad (11)$$

Як правило, прогнози контейнеропотоків формуються для лінії у цілому. Якщо тільки одне судно працює на лінії, то параметри його обсягів роботи $\overline{Q}_{lk}^{n\gamma}, \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}}$ формуються тільки на базі параметрів контейнеропотоків $\overline{Q}_{lk}^n, \sigma_{Q_{lk}^n}$, згідно відповідній епюрі контейнеропотоків. Якщо на маршруті працюють декілька суден компанії, то $\overline{Q}_{lk}^{n\gamma}, \sigma_{Q_{lk}^{n\gamma}}$ може бути прийнято з урахуванням пропорційності контейнеромісткостей суден.

Слід зазначити, що запропонований далі підхід відповідає ситуації, коли загальні провізні здатності суден не менш, ніж загальні обсяги перевезень. Якщо провізної здатності не вистачає, то слід виконати аналогічні розрахунки для іншого складу суден. Як правило, така процедура носить попередній характер та виконується шляхом порівняння відповідних показників. Отже, для оцінки перспективних обсягів роботи суден на лінії між певною парою портів пропонується використовувати наступний підхід (рис. 1).

На першому етапі розраховуються δ_{γ}^n частки розподілу контейнеропотоків між суднами:

$$\delta_{\gamma}^n = \frac{K_{n\gamma}}{\sum_{\gamma=1}^{\gamma_n} K_{n\gamma}}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, n = \overline{1, N}. \quad (12)$$

На другому етапі визначаються варіанти обсягів перевезень між портами лінії з урахуванням епюрі контейнеропотоків:

$$\overline{Q}_{lk}^{work-n}, Q_{lk}^{work-n}, Q_{lk}^{nwork-n}, k, l = \overline{1, v_n}, n = \overline{1, N}. \quad (13)$$

Потім визначається обсяг роботи для кожного судна з урахуванням частки судна в загальному обсязі роботи – якщо відомо, які судна працюватимуть на лінії:

$$\overline{Q}_{lk}^{n\gamma} = \delta_{\gamma}^n \cdot \overline{Q}_{lk}^{work-n}, Q_{lk}^{n\gamma} = \delta_{\gamma}^n \cdot Q_{lk}^{nwork-n},$$

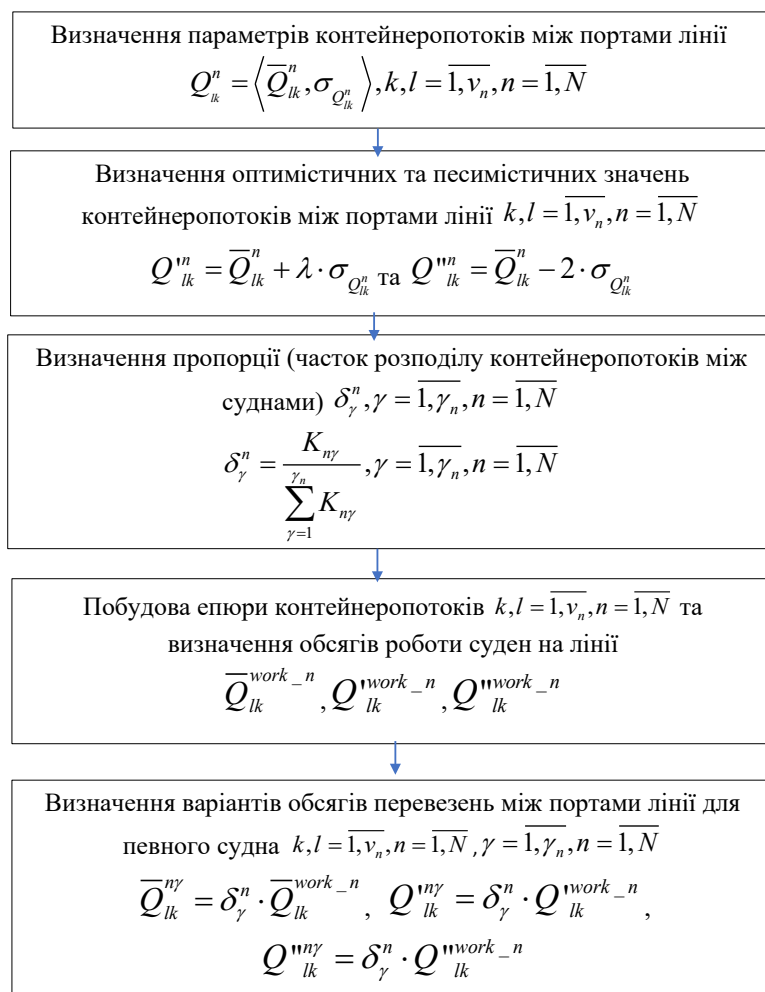


Рис. 1. Схема визначення обсягів перевезень між портами лінії для певного судна з урахуванням невизначеності

$$Q_{lk}^{*n\gamma} = \delta_\gamma^n \cdot Q_{lk}^{*work\_n}, \quad (14)$$

$$k, l = \overline{1, v_n}, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}.$$

Отже, маємо наступну схему (рис. 1) оцінки обсягів роботи суден для оперативного рівня – перевезень між портами лінії для певного судна, де $\bar{Q}_{lk}^{n\gamma}, Q_{lk}^{*n\gamma}, Q_{lk}^{**n\gamma}$, відповідно, очікуваний, оптимістичний та песимістичний варіанти.

Що стосується стратегічного рівня управління роботою суден, контейнеропотоки даного рівня характеризуються законом розподілу, на базі якого можна встановити математичне очікування $\bar{Q}_{lk}^n$ та середньоквадратичне відхилення $\sigma_{Q_{lk}^n}$.

Уявляється доцільним використовувати наступні формули переходу від річних обсягів роботи судна до обсягів роботи для одного рейсу:

$$\bar{Q}_{lk}^{n\gamma} = \delta_\gamma^n \cdot \frac{T_{n\gamma}}{T} \cdot \bar{Q}_{lk}^{work\_n}, Q_{lk}^{*n\gamma} = \delta_\gamma^n \cdot \frac{T_{n\gamma}}{T} \cdot Q_{lk}^{*work\_n},$$

$$Q_{lk}^{**n\gamma} = \delta_\gamma^n \cdot \frac{T_{n\gamma}}{T} \cdot Q_{lk}^{**work\_n}, \quad (15)$$

$$k, l = \overline{1, v_n}, n = \overline{1, N}, \gamma = \overline{1, \gamma_n}, n = \overline{1, N},$$

де T – період часу, для якого встановлено прогнози обсягів роботи; $\frac{T_{n\gamma}}{T}$ – частка рейсу в рамках періоду, для якого розроблявся прогноз; δ_γ^n встановлює частку обсягів роботи певного судна у загальному обсягу (для лінії у цілому).

Таким чином, запропоновані формули дозволяють здійснити перехід від прогнозів річних контейнеропотоків для компанії на лінії до обсягів роботи певного судна на даній лінії на рівні окремого рейсу. Отже, у процесі управління використовуватимуться три «класичних» варіанти ефективності – оптимістичний, песимістичний та очікуваний.

Висновки. В даному дослідженні запропоновано формулу тайм-чартерного еквіваленту для судна-контейнеровозу на лінії, яка враховує ймо-

вірнісну природу обсягів перевезень, як похідну від невизначеності контейнеропотоків.

Визначено послідовність та сутність етапів процесу прогнозування обсягів перевезень між портами лінії для певного судна з урахуванням невизначеності контейнеропотоків. Оцінка контейнеропотоків та відповідних обсягів роботи суден передбачає розгляд трьох прогнозних значень – оптимістичного, песимістичного та більш ймовірного (середнього), що формується з урахуванням математичного опису невизначеності контейнеропотоків на оперативному та стратегічному рівнях управління. Сформульовані вирази тайм-чартерного еквіваленту судна-контейнеровоза для трьох варіантів обсягів перевезень – очікуваного, оптимістичного та песимістичного для

кожного рівня управління з урахуванням специфіки врахування невизначеності, а також переходу від обсягу роботи компанії на лінії до обсягу роботи кожного судна на даній лінії, що встановлюється за допомогою коефіцієнтів, які відображають частку контейнеромісткості судна у загальній контейнеромісткості суден, що працюють на лінії. Дана формула дозволяє оцінювати перспективну ефективність роботи суден-контейнеровозів для своєчасного корегування лінійного сервісу – розміру судна, портів лінії, перш за все. Порівняння прогнозованої ефективності з фактичною також надаватиме додаткову інформацію для осіб, які приймають рішення щодо управління роботою флоту та функціонування лінійного сервісу.

Список літератури:

1. Review of Maritime Transport 2024. URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024> (дата звернення 10.05.2025)
2. Notteboom T, Parola F, Satta G., Pallis, A.A. The relationship between port choice and terminal involvement of alliance members in container shipping, *Journal of Transport Geography*. 2017. № 64. С. 158-173.
3. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Yaremenko N., Maliuha E., Honcharuk, I., Shamov O. Innovative Technologies for the Maritime Industry: Hydrogen Fuel as a Promising Direction. *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. № 510. P. 23-34. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-03>
4. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10
5. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*. Том 35 (74). 2024. № 1. С. 139-146. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.2/23
6. Бондаренко Ю.А. Структура та параметри системи морських контейнерних перевезень компанії-перевізника. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2024. Том 35 (74). № 2. С. 271-279. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.2/37
7. Drozhzhyn O. Containership Traffic Optimization on Feeder Shipping Line. *Transport and Telecommunication Journal*. 2016. Vol.17(4). P. 314-321. DOI: 10.1515/ttj-2016-0028
8. Drozhzhyn O., Koskina, Y. The model of container feeder line organization focused on the nature and parameters of external container flows. *Komunikácie*. 2021. Vol. 23(2). DOI: 10.26552/com.C.2021.2.A94-A102
9. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. T. 1. (2(51)), P.24–29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373
10. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2021. 4(11), 82-93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08
11. Onyshchenko S., Savelieva I., Melnyk O., Koryakin K., Kotenko O. Enhancing Safety and Efficiency in Maritime Ergatic Systems Through Advanced Information Technologies. *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport*. 2021. P. 295-308.
12. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. P. 223-235. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14
13. Haralambides H.E. Gigantism in container shipping, ports and global logistics: a time-lapse into the future. *Maritime Economics and Logistics*. 2019. Vol. 21. P. 1-60. DOI: 10.1057/s41278-018-00116-0
14. Henry S. M., Hoffman M. J., Waddell L. A., Muldoon F. M. Holistic fleet optimization incorporating system design considerations. *Naval Research Logistics (NRL)*. 2023. Vol. 70(7). P. 675-690.
15. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shcherbina O., Vasalatii N. Simulation-Based Method for Predicting Changes in the Ship's Seaworthy Condition Under Impact of Various Factors. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol 481. P. 653-664. DOI: 10.1007/978-3-031-35088-737
16. Koskina Y., Onyshenko S., Drozhzhyn O., Melnyk O. Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023. Vol. 20. P. 137-149. DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9

Onyshchenko S.P., Melnyk O.M., Bondarenko Yu.A., Prysyazhnyuk A.M. ASSESSMENT OF THE CONTAINER SHIPS EFFICIENCY TAKING INTO ACCOUNT THE CONTAINER FLOWS UNCERTAINTY

The purpose of this study is to develop theoretical provisions on the assessment of the efficiency of container ships on the lines, taking into account the uncertainty of container flows, which will ensure the validity of decisions in the fleet management system of shipping companies, due to the consideration of the real conditions of their operation.

A formula for the time charter equivalent for a container ship on the line is proposed, which takes into account the probabilistic nature of transportation volumes, as a derivative of the uncertainty of container flows. The sequence and essence of the stages of the process of forecasting the volumes of transportation between the ports of the line for a particular ship, taking into account the uncertainty of container flows, is determined. The assessment of container flows and the corresponding volumes of vessel work involves the consideration of three forecast values – optimistic, pessimistic and more probable (average), which is formed taking into account the mathematical description of the uncertainty of container flows at the operational and strategic levels of management. The expressions of the time charter equivalent of a container ship are formulated for three variants of transportation volumes – expected, optimistic and pessimistic for each level of management, taking into account the specifics of taking into account uncertainty, as well as the transition from the volume of work of the company on the line to the volume of work of each vessel on a given line, which is established using coefficients that reflect the share of the container capacity of the vessel in the total container capacity of vessels operating on the line. This formula allows you to assess the prospective efficiency of the operation of container ships for timely adjustment of the line service – the size of the vessel, ports of the line, first of all. Comparison of the predicted efficiency with the actual one will also provide additional information for those who make decisions on fleet management and the functioning of the line service.

Key words: container transportation, sea transport, cargo transportation, organization, transport services, efficiency, line service, time charter equivalent, uncertainty, probability, transportation volumes, container flows.

Дата надходження статті: 24.07.2025

Дата прийняття статті: 29.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Петров Л.М.

Військова академія, Одеса

Петрик Ю.М.

Військова академія, Одеса

Борисенко Т.М.

ТОВ «Агентство продажу активів»

ТЕОРІЯ Л.М. ПЕТРОВА З ДОДАТКАМИ ПЕТРИКА ТА БОРИСЕНКА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕОРЕМИ ЕЙЛЕРА-ШАЛЯ ДЛЯ КОЛІСНОГО РУШІЯ АВТОМОБІЛЯ

В статті авторів Л.М. Петрова, Ю.М. Петрика, Т.М. Борисенка представлена теоретична розробка вдосконалення технології розгортання плями контакту шини колісного рушія автомобіля та розрахунку процесу такого розгортання шляхом урахування процесу руху точки прикладання сили ваги до плями контакту. Проведений аналіз поточних досліджень в приведеному науковому напрямку, а також аналіз сучасних наукових та технічних рішень для умов переміщення автомобіля з застосуванням колісних рушіїв, а також вплив динаміки розгортання плями контакту колісного рушія на робочі параметри руху автомобіля.

Окрему увагу приділено оптимізації параметру довжини плями контакту шини колісного рушія з опорною поверхнею для досягнення найбільшої ефективності на різних типах дорожнього покриття, а також в умовах бездоріжжя, що найбільш притаманно вантажної автомобільної техніці. Виконано теоретичний аналіз тиску на поверхню в залежності від розміру шини колеса, а також проведено оцінювання зміни коефіцієнта зчеплення у різних дорожніх умовах та вплив його на довжину плями контакту. Розглянуто вплив параметрів руху колісного рушія на динамічну поведінку автомобіля: збільшення чи зменшення радіуса кривизни розгортання плями контакту.

Приведено фізико-математичну модель розгортання плями контакту відносно опорної поверхні технічні рішення для автоматичного налаштування плями контакту шини колісного рушія, які дають змогу підлаштовуватись до різних дорожніх умов без потреби зупинки автомобіля. У статті також звертається увага на технічний бік впровадження технології оцінки руху плями контакту в залежності від паспортних даних виготовлення шини.

Проведений порівняльний огляд існуючих теоретичних досліджень динаміки руху плями контакту та запропонованої теорії динамічному розгортанні плями контакту шини колісного рушія вантажного автомобіля. Приведені результати розрахунку основного параметра розгортання плями контакту, які показують ефективність використання даної теорії для поліпшення роботи і експлуатації вантажного транспортного засобу.

Проведено оцінку застосування запропонованої теорії для вирішення надійної експлуатації вантажних машин у важких дорожніх умовах. Особливу увагу автори звертають на майбутнє впровадження запропонованої теорії, а саме, реалізацію у військовій та цивільній сферах.

Ключові слова: прохідність, теорія, оптимізація геометрії, коефіцієнт зчеплення, маневреність, вантажний автомобіль.

Постановка проблеми. Конструкція колісного рушія з автомобільною шиною – складна, багатифункціональна конструкція. Основним призначенням колісного рушія з автомобільною шиною є не тільки зменшення динамічних поштовхів і ударів, які можуть передаватися на підвіску авто-

мобіля та дуже важливо це забезпечувати надійне зчеплення ведучого колеса з дорожнім покриттям, керованість, та створювати і передавати на автомобіль дотичні сили тяги і гальмівні сили. Закладені конструкторами та технологами конструкційні елементи в шину в значній мірі визначають

прохідність автомобіля в різних дорожніх умовах, коефіцієнт зчеплення, шум і витрата палива у автомобіля під час його руху [3, 6]. Крім цього, шина, яка одягнена на ведуче колесо повинна забезпечувати довготривалу робото спроможність, надійність виконання робочого процесу при заданій вантажопідйомності [2]. Це є важливим поєднанням елементів ведучого колеса автомобіля, що поєднує в собі пружну резино-метало-тканинну оболонку. Колісний рушій з автомобільною шиною повинен забезпечити контакт транспортного засобу з фізичними показниками дорожнього покриття, призначений для поглинання незначних коливань, викликаних недосконалістю дорожнього покриття, компенсації похибки траєкторій коліс, реалізації та сприйняття різноманітних сил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити автори багато [4] уваги приділяли взаємодії шини колісного рушія зі шляхом. Ними було показано, [6] що взаємодія колеса з дорогою відбувається на площині відбитка шини на поверхні дороги (плямі контакту) (рис. 1а, 1б).

В роботі [4] приведено схему сил, що діють на ведуче колесо (рис. 2).

Також в цій же роботі [4] приведена розрахункова схема процесу взаємодії автомобільного колеса з ґрунтом (рис. 3).

ω_0 – колова швидкість осі колеса; ω_k – колова швидкість еластичної периферії шини; M_k – крутний момент прикладений до осі колеса; M тер – момент тертя; G_k вертикальне навантаження на колесо; $-C_z$ – тангенціальна жорсткість шини; C_x – радіальна жорсткість шини.

В [4] автори привели графічну залежність кутового зміщення зовнішньої частини шини щодо осі колеса від часу при постійній величині кутової швидкості осі колеса і при різних значеннях співвідношення її радіальної й тангенціальної жорсткості.

Метою розробки є вдосконалення технології розгортання плями контакту шини колісного рушія автомобіля та розрахунку процесу такого розгортання шляхом урахування процесу руху точки прикладання сили ваги до плями контакту. Для досягнення поставленої мети сформульовані завдання.

Задачі дослідження: 1. Виконати теоретичний аналіз існуючих методів і підходів дослідження руху плями контакту, навести причини, щодо виявлення недостатньої глибини дослідження руху плями контакту. 2. Розробити геометрію у вигляді ескізної моделі колісного рушія з автомобільною шиною з відтворенням процесів, що відбуваються при розгортанні плями контакту різної геометрії. 3. Надати теоретичний опис процесів змін механічних, динамічних і експлуатаційних характеристик шини колісного рушія у вигляді математичних моделей, що можуть бути використані для прогнозування їх властивостей в процесі роботи. 4. Виготовити вимірювально-випробувальний комплекс із здатністю визначення деформацій шини в точках змін її форми при розгортанні плями контакту різної геометрії з усіх станів деформації навантажених дільниць колеса.

Вантажні автомобілі розроблені для використання в важких дорожніх умовах, таких як бездоріжжя, заболочені місця, піщані або снігові

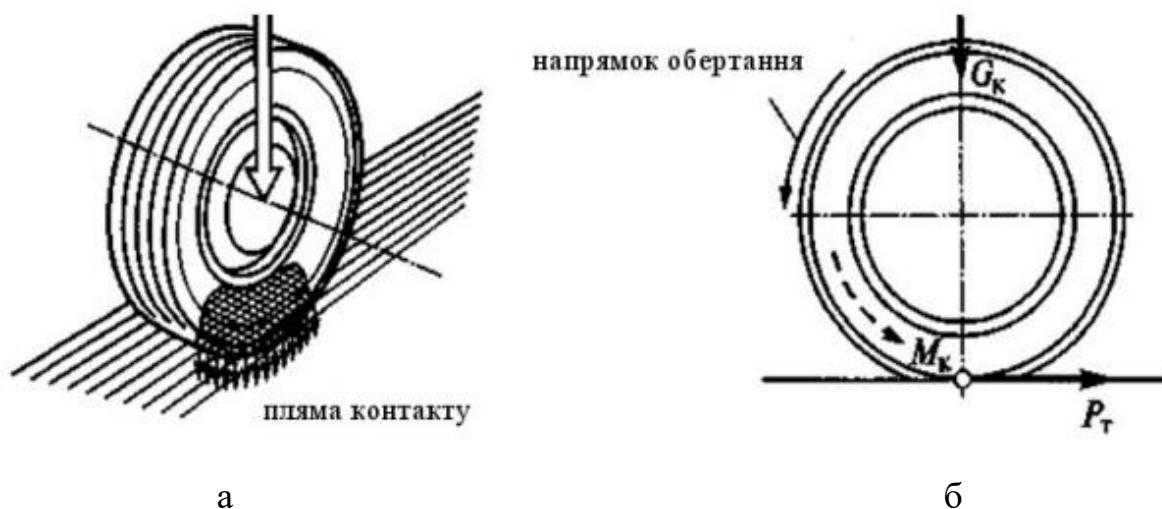


Рис. 1. Взаємодія колеса з дорогою через пляму контакту: а – контакт колісного рушія з дорогою; б – навантаження колісного рушія силовими факторами

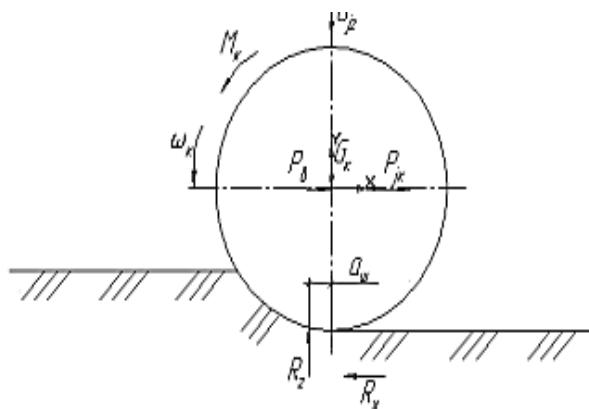


Рис. 2. Схема сил, що діють на автомобільне колесо в ведучому режимі

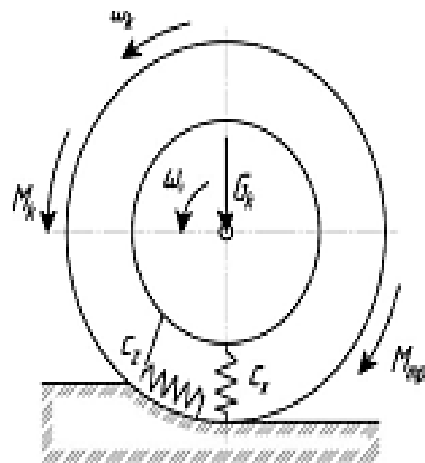


Рис. 3. Розрахункова схема процесу взаємодії ведучого колеса з ґрунтом

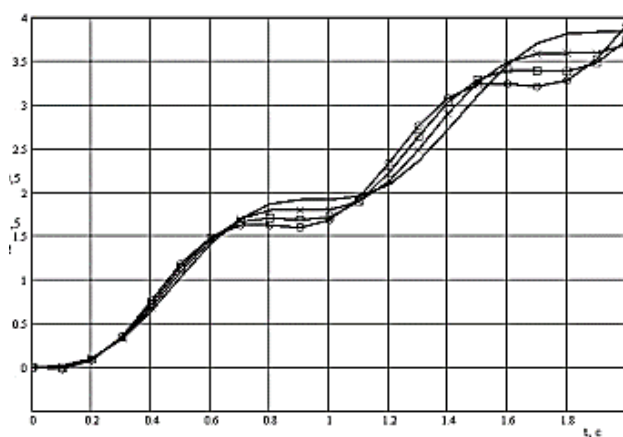


Рис. 4. Залежність кутового зміщення зовнішньої частини шини щодо осі ведучого колеса у часі

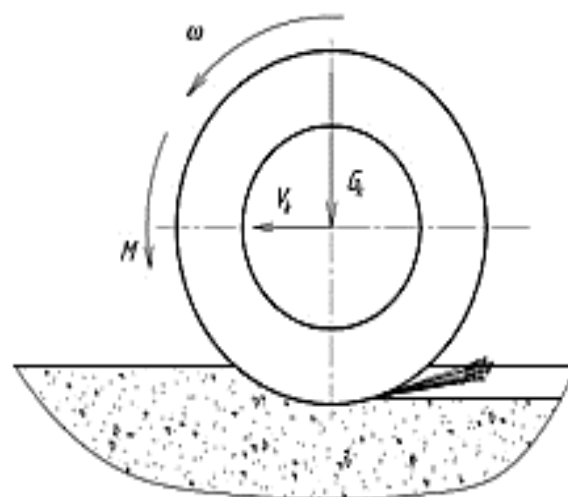


Рис. 5. Розрахункова схема викиду ґрунту із зони контакту колеса з ґрунтом



Рис. 6. Випробовування автомобіля з розширеною зоною плями контакту



Рис. 7. Випробовування автомобіля зі зниженим тиском та збільшеною площиною плями контакту



Рис. 8. Випробовування автомобіля з рідкою плямою контакту



Рис. 9. Випробовування автомобіля зі зниженим тиском в шинах



Рис. 10. Випробовування автомобіля у глибокій колії



Рис. 11. Випробовування автомобіля на піщаному ґрунті



Рис. 12. Випробовування автомобіля на каміннях



Рис. 13. Випробовування автомобіля в гористій місцевості



Рис. 14. Випробовування автомобіля з гусеничним колісним рушієм



Рис. 15. Випробовування автомобіля в засніженій місцевості



Рис. 16. Випробовування автомобіля в гірській місцевості



Рис. 17. Випробовування автомобіля в умовах діагонального вивішування

поверхні. У таких ситуаціях основними факторами, що забезпечують успішний рух, є відмінна прохідність, стійкість на різноманітних типах дорожнього покриття та здатність до ефективного керування.

Враховуючи вище вказані переваги, проблема адаптації автомобілів до різних умов експлуатації можуть бути вирішені за допомогою теорії розкручування плями контакту, що може стати предметом подальшого дослідження даної динаміки з метою розширення її можливостей. На рисунках (6–17) показано адаптування автомобілів до різних умов експлуатації шляхом розкручування плями контакту.

Постановка завдання.

Уявимо собі геометрію кочення колісного рушія з геометрією плями контакту (рис. 18), що може відповідати теорії кочення коліс [1, 5].

На рисунку (19) показано фізичну модель руху плями контакту при обертанні колісного рушія.

P – сила ваги;

OC_0 – плече кочення;

OC – деформована частина шини при контакті з опорною поверхнею та відриву її від опорної поверхні;

α – кут відриву від поверхні плями контакту;

дуга OC – умовно недеформована частина колісного рушія.

Згідно з (рис. 19) динамічне розкручування плями контакту OC починається з прикладання до колісного рушія -1 сили ваги P , при цьому розкручування починається з моменту точки C_0 у вздовж геометрії плями контакту з положення C_0 у вздовж ваги спотвореної плями контакту по прямій OC зі швидкістю v , яка складає частку довжини плями контакту та її пропорційною:

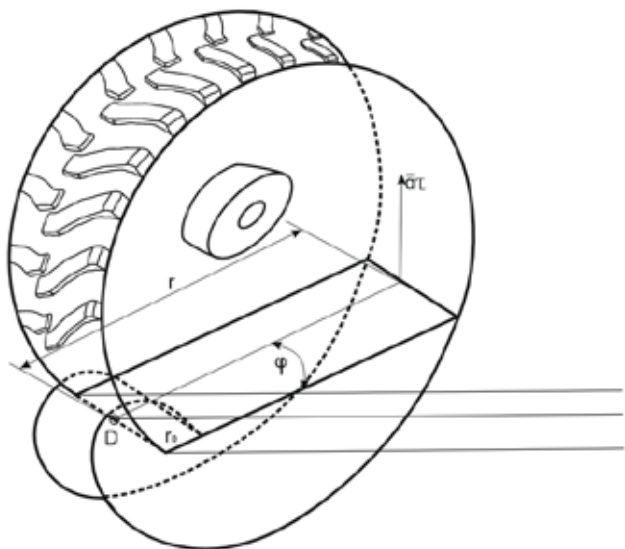


Рис. 18. Геометрія руху плями контакту

$$OC = r$$

Тоді можна записати:

$$V = K * r$$

При цьому маємо на увазі, що при $t_0=0$ тобто в момент часу D, $r = r_0$.

Також накладаємо умови, що площа плями контакту відповідна їй лінія ОС обертається в площині рисунка. Пляма ОС при обертанні колісного рушія 1 та її розкручування утворює з віссю X кут α :

$$\alpha = \omega t$$

$\omega - \omega = const$ – кутова швидкість колісного рушія.

Виклад основного матеріалу. Так як рух точки C_0 плями контакту відбувається на площині, тому визначимо закон руху плями контакту використовуючи попарні координати r і α .

Тоді радіальна проекція швидкості буде мати вигляд

$$V_r = \frac{dr}{dt} = V = Kr \quad (1)$$

Обидві частини рівняння (1) поділимо на r та помножимо на dt .

Звідки з формули (1)

$$\frac{dr}{r} = K dt \quad (2)$$

Складаємо інтегральне рівняння

$$\int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \int_0^t K dt \quad (3)$$

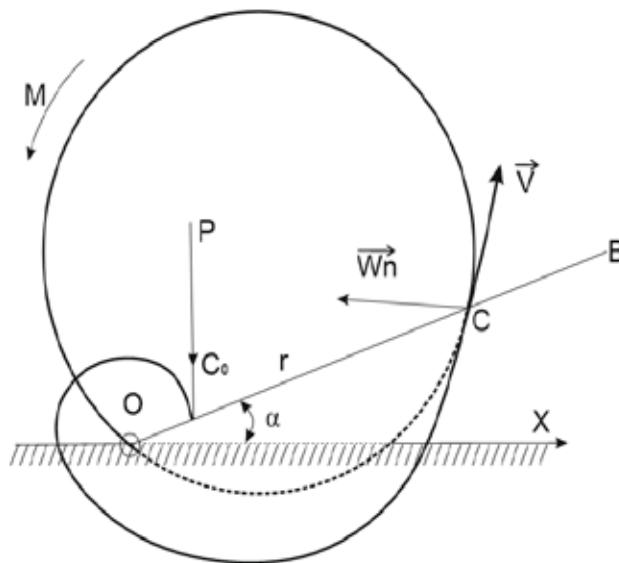


Рис. 19. Фізична модель геометрії руху плями контакту при коченні колісного рушія

З інтегрального рівняння (3) маємо

$$\ln \frac{r}{r_0} = Kt \quad (4)$$

З рівняння (4) отримуємо

$$r = r_0 e^{Kt} \quad (5)$$

Рівняння (5) буде рівнянням руху плями контакту (умовної точки C) у полярних координатах

$$r = r_0 e^{Kt} \quad (6)$$

$$\alpha = \omega t \quad (7)$$

З рівняння для кута повороту α вилучимо складову t

$$t = \frac{\alpha}{\omega}$$

Та підставимо це значення у рівняння для r_0 отримаємо рівняння для руху плями контакту та її розгортання відносно опорної поверхні

$$r = r_0 \cdot e^{\frac{K}{\omega} \alpha} \quad (8)$$

Рівняння (8) показує, що розгортання плями контакту відбувається по логарифмічній спіралі.

Будемо визначати швидкість та прискорення розгортання плями контакту за 2-х радіальними та трансверсальними проекціями:

$$\text{швидкість } V_r = r = r_0 K e^{Kt} = Kr;$$

$$V_\varphi = r \dot{\varphi};$$

$$\text{Прискорення } W_r = \dot{r} - r \dot{\alpha}^2 = (K^2 - \omega^2) r;$$

$$U\alpha = r \ddot{\alpha} + 2r \dot{\alpha} = 2K\omega r;$$

Так як прийнято, що $\omega = const$, тому $\ddot{\alpha} = 0$.

Тоді швидкість точки буде:

$$V = \sqrt{Vr^2 + V\alpha^2} = r\sqrt{K^2 + \omega^2},$$

а величина прискорення

$$W = \sqrt{Wr^2 + W\alpha^2} = r\sqrt{(K^2 - \omega^2)^2 + 4K^2\omega^2} = (K^2 + \omega^2) \cdot r$$

Дотичне прискорення розібране плями контакту визначимо за формулою:

$$W\tau = \frac{dv}{dt} = \sqrt{K^2 + \omega^2} \cdot r = Kr\sqrt{K^2 + \omega^2} \quad (9)$$

Нормальне прискорення розгортання плями контакту визначаємо з формули:

$$Wn = \sqrt{W^2 - W\tau^2} = \sqrt{(K^2 + \omega^2)r^2 - K^2r^2(K^2 + \omega^2)} = r\omega\sqrt{K^2 + \omega^2} \quad (10)$$

Тоді радіус кривизни розгортання плями контакту будемо визначати за формулою

$$\rho = \frac{V^2}{Wn} = \frac{(r\sqrt{K^2 + \omega^2})^2}{r\omega\sqrt{K^2 + \omega^2}} = \frac{r\sqrt{K^2 + \omega^2}}{\omega}$$

Матеріали та методи досліджень. За теоремою Ейлера-Шаля [1] плоский рух вважається як обертальний навколо миттєвого центра обертань, або центра швидкостей.

Полусом є миттєвий центр швидкостей (МЦШ), тобто така точка P рухомої площини, жорстко скріпленої з фігурою, швидкість якої в певний момент часу дорівнює нулю $\vec{V}_P = 0$.

Тоді, $V_B = V_{BP} = \omega \cdot BP$ тобто швидкість будь-якої точки фігури дорівнює за величиною добутку модуля кутової швидкості фігури на відстань від цієї точки до МЦШ та спрямована перпендику-

лярно до цього відрізка проти напрямку годинникової стрілки, якщо $\omega > 0$ і навпаки.

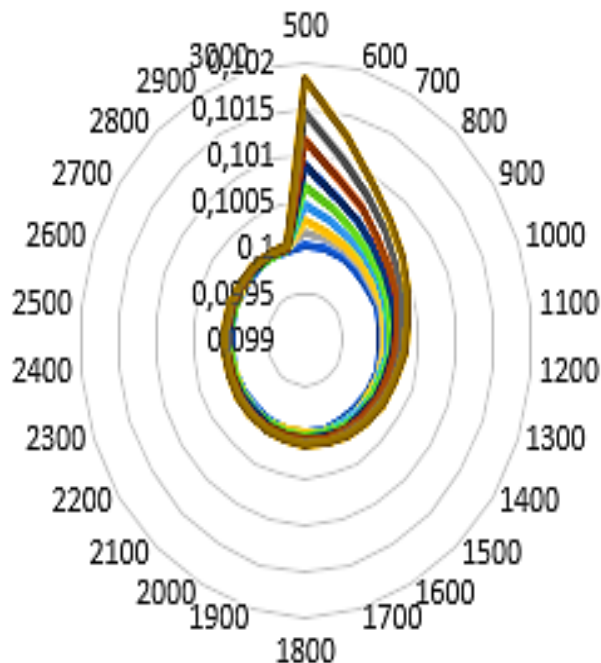


Рис. 20. Логарифмічна діаграма розкручування плями контакту колісного рушія.

Висновки. Використання в матеріалах статті теореми Ейлера-Шаля шляхом теоретичних розрахунків до руху плями контакту колісного рушія доводить, що деформована частина шини при розгортанні має плоский рух як обертальний навколо миттєвого центра обертань в точці прикладення сили ваги автомобіля.

Вперше авторами було отримано формулу кривизни розгортання плями контакту колісного рушія автомобіля з опорною поверхнею.

Список літератури:

1. Федотов В. О., Віштак І. В., Молодецька Т. І. Теоретична та прикладна механіка. (Технічна механіка) Самостійна та індивідуальна робота студентів. Частина 1. – 2017.
2. Шевченко С.І., Полупан Є.В. Аналіз впливу механічної характеристики приводу при гальмуванні на динамічні навантаження. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2019. № 2, (250). С. 125–130.
3. Петров Л.М., Кішяну І.В., Скоріченко О.І. Проект автомобіля з додатковим реактивним поштовхом у зоні плями контакту колісного рушія з опорною поверхнею: монографія. Рига: Baltija Publishing. 2019. С. 229–246.
4. Опанасюк Є. Г., Бегерський Д. Б. До визначення сил, що діють на автомобільне колесо при буксуванні. – 2016. Опанасюк Є. Г. До визначення сил, що діють на автомобільне колесо при буксуванні // Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки». – 2016. – №. 1 (76). – С. 128–137.
5. Leontiev D., Don E. Specifics of automobile dual wheels interaction with the supporting surface // Автомобильный транспорт. – 2016. – №. 39. – С. 74–79.
6. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей : навчальний посібник / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. О. Огневий, Є. В. Смирнов – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 163 с.

Petrov L.M., Petryk Yu.M., Borisenko T.M. L.M. PETROV'S THEORY WITH APPENDICES BY PETRYK AND BORYSENKO USING THE EULER-SCHAL THEOREM FOR THE WHEEL PROPULSION OF A CAR

The article by authors L.M. Petrov, Y.M. Petryk, T.M. Borysenko presents a theoretical development of improving the technology of deploying the contact patch of a tire of a wheeled vehicle and calculating the process of such deployment by taking into account the process of movement of the point of application of gravity to the contact patch. An analysis of current research in the given scientific direction was conducted, as well as an analysis of modern scientific and technical solutions for the conditions of vehicle movement using wheel drives, as well as the influence of the dynamics of the deployment of the wheel drive contact patch on the operating parameters of the vehicle movement.

Special attention is paid to optimizing the parameter of the length of the contact patch of the wheel drive tire with the supporting surface to achieve the greatest efficiency on various types of road surfaces, as well as in off-road conditions, which is most characteristic of trucking equipment. A theoretical analysis of the pressure on the surface depending on the tire size of the wheel was performed, as well as an assessment of the change in the coefficient of adhesion in different road conditions and its effect on the length of the contact patch. The effect of the parameters of the wheel drive on the dynamic behavior of the vehicle was considered: increasing or decreasing the radius of curvature of the contact patch deployment.

A physical and mathematical model of the deployment of the contact patch relative to the supporting surface is presented, as well as technical solutions for automatic adjustment of the contact patch of the tire of a wheeled vehicle, which allow adapting to different road conditions without the need to stop the vehicle. The article also draws attention to the technical side of implementing the technology for assessing the movement of the contact patch depending on the passport data of the tire manufacturing.

A comparative review of existing theoretical studies of the dynamics of contact patch motion and the proposed theory of dynamic deployment of the contact patch of a truck wheel drive tire was conducted. The results of calculating the main parameter of contact patch deployment are presented, which show the effectiveness of using this theory to improve the operation and maintenance of a cargo vehicle.

The application of the proposed theory to solve the problem of reliable operation of trucks in difficult road conditions is assessed. The authors pay special attention to the future implementation of the proposed theory, namely, its implementation in the military and civilian spheres.

Key words: *cross-country ability, theory, geometry optimization, adhesion coefficient, maneuverability, truck.*

Дата надходження статті: 04.07.2025

Дата прийняття статті: 11.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Хітров І.О.

Національний університет водного господарства
та природокористування

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КУЗОВА ВАНТАЖНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА БЕЗПЕКУ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ

Необхідність дослідження конструктивних особливостей кузова вантажного транспортного засобу зумовлена вирішальним впливом на безпеку перевезення вантажів в умовах зростання інтенсивності руху, підвищення експлуатаційних вимог та посилення контролю за технічним станом. У статті розкрито роль кузова як ключового елемента транспортного засобу, що забезпечує фізичну цілісність, захист вантажу від зовнішніх чинників, а також впливає на стійкість і маневреність під час експлуатації. Розкрито сучасні підходи до підвищення безпечності конструкції кузова, визначено залежність між типом кузова, розподілом маси, положенням центра ваги та загальною стійкістю транспортного засобу. З'ясовано, що саме від конструктивних рішень залежить не лише збереження вантажу, а й динамічна поведінка транспортного засобу, зокрема під час гальмування, поворотів та руху нерівною дорогою. У роботі узагальнено типи кузовів (контейнерні, тентовані, фургони, ізомермічні, самоскиди, цистерни) та їх вплив на умови безпечного перевезення. Значну увагу приділено питанню стійкості конструкції і використанню елементів пасивної безпеки, таких як деформаційні зони, каркаси жорсткості, засоби фіксації вантажу. Особливої актуальності набуває впровадження систем контролю вантажопідйомності та розподілу навантаження. Визначено перспективні напрямки подальших досліджень, зокрема розвиток адаптивних конструкцій кузовів із врахуванням змінних умов експлуатації та типів вантажів, а також інтеграція інтелектуальних систем для контролю за стійкістю та безпекою вантажоперевезень. Стаття має практичну цінність для конструкторів, інженерів, логістів. Запропоновані підходи можуть бути ефективно використані при проектуванні нових моделей вантажних транспортних засобів, а також при модернізації існуючих конструкцій з урахуванням сучасних вимог до безпеки, ефективності та екологічної відповідності. Представлені результати також можуть бути корисними у навчальному процесі підготовки фахівців транспортної галузі, формуючи у них системне розуміння взаємозв'язку конструкції кузова з параметрами безпеки.

Ключові слова: вантажний транспортний засіб, кузов, безпека перевезень, тип кузова, центр мас, стійкість конструкції, вантажні перевезення.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного розвитку вантажних перевезень підвищення безпеки транспортування вантажів набуває особливого значення. Одним із ключових факторів, що впливає на безпеку перевезень, є конструктивні особливості кузова вантажного транспортного засобу. Невідповідність конструкції вимогам до стійкості, жорсткості, розподілу маси та фіксації вантажу може призводити до пошкодження вантажу, нестійкості транспортного засобу на дорозі, аварійних ситуацій і навіть катастроф. Водночас існуючі підходи до оцінки кузовів не завжди враховують специфіку умов експлуатації, типи вантажів та змінні навантаження, що виникають у процесі перевезень. Це

зумовлює необхідність комплексного аналізу впливу конструктивних рішень кузова на безпеку перевезення, удосконалення методів дослідження та впровадження новітніх технологій і матеріалів. Тому виникає проблема забезпечення оптимального конструктивного виконання кузова вантажного транспортного засобу з метою підвищення надійності та безпеки вантажоперевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення впливу конструктивних особливостей кузова вантажних транспортних засобів на безпеку перевезення вантажів є важливою складовою сучасного автомобільного інжинірингу. Останні дослідження підтверджують, що конструктивні особливості кузова вантажного транспортного

засобу мають значний вплив на безпеку перевезення вантажів.

Аналіз конструкції кузова вантажного транспортного засобу показує, що використання високоякісних матеріалів, таких як алюмінієві сплави та композити, дозволяє зменшити вагу без шкоди для міцності та безпеки. Це сприяє покращенню маневреності та зменшенню негативного впливу на інших учасників дорожнього руху [1].

Корозія конструктивних елементів кузова значно знижує їх міцність та стійкість до навантажень, що підвищує ризик аварійних ситуацій. Навіть незначні пошкодження захисного покриття можуть призводити до значного зниження експлуатаційних характеристик кузова [2].

Стійкість вантажного транспортного засобу, особливо при маневрах, гальмуванні та русі по нерівній дорозі, значною мірою залежить від конструкції кузова та розташування його центра маси. Оптимізація геометрії кузова та рівномірний розподіл вантажу дозволяють підвищити стійкість транспортного засобу, зменшуючи аварійність [3].

Невідповідність конструкції кузова вимогам безпеки може призводити до серйозних наслідків під час ДТП. Зокрема, недостатнє закріплення вантажу може спричинити його переміщення під час руху і збільшити ризик аварій [4].

Сучасні методи моделювання дозволяють детально аналізувати поведінку кузова під різними навантаженнями. Це дає змогу оптимізувати конструкцію для досягнення балансу між міцністю, вагою та головне – безпекою [5].

Конструкція транспортних засобів істотно впливає на рівень безпеки, а впровадження інноваційних рішень сприяє підвищенню захисту водія, пасажирів і вантажу в умовах експлуатації [6].

Постановка завдання. Метою статті є узагальнене дослідження впливу конструктивних особливостей кузова вантажного транспортного засобу на безпеку перевезення вантажів, а також обґрунтування технічних рішень, спрямованих на підвищення стійкості, надійності та безпечності конструкції кузова в умовах експлуатації з урахуванням типів вантажів, дорожніх умов і динамічних навантажень.

Виклад основного матеріалу. Вантажний транспортний засіб – це автомобільний транспортний засіб, конструкція якого призначена переважно для перевезення вантажів. Він може мати різні форми кузова (платформа, фургон, самоскид, цистерна тощо) і обладнаний відповідно до виду вантажу, який перевозиться.

Вантажний транспортний засіб широко використовується в промисловості, сільському господарстві, будівництві, торгівлі, логістиці, комунальному господарстві, військовій сфері та надзвичайних ситуаціях. Він забезпечує перевезення сировини, продукції, техніки, матеріалів і товарів, а також виконує спеціалізовані функції. Його універсальність підтверджує ключову роль у розвитку інфраструктури та економіки.

Законодавче визначення вантажного автомобіля в Україні зафіксоване у кількох нормативно-правових документах. Зокрема, згідно з Правилами дорожнього руху України, «вантажний автомобіль» – це автомобіль, призначений для перевезення вантажів. Це визначення є ключовим для встановлення вимог до експлуатації, обмежень руху та поділу за категоріями.

Згідно ДСТУ 2984:1995 «Засоби транспортні дорожні. Типи. Терміни та визначення» подано визначення, згідно з яким вантажний автомобіль – це автомобіль, що за своєю конструкцією та обладнанням призначений для перевезення вантажів. Це визначення є базовим у технічному регулюванні і широко використовується в інженерній, транспортній та нормативній документації.

Призначення кузова вантажного транспортного засобу полягає у забезпеченні цілісного, безпечного та ефективного транспортування вантажів із врахуванням їхніх фізичних, хімічних, геометричних та експлуатаційних властивостей [7, 8]. Конструкція кузова має відповідати специфіці перевезених вантажів, їх чутливості до зовнішніх впливів, форми, маси, а також умов транспортування – дальності, маршруту, типу дорожнього покриття.

Насамперед, кузов слугує основним елементом для розміщення вантажу. Він забезпечує необхідний простір для зручного завантаження, фіксації, перевезення та розвантаження продукції. Його геометричні параметри – об'єм, форма, тип платформи – визначають не лише вантажопідйомність транспортного засобу, а також його функціональну ефективність в сфері застосування (наприклад, ізотермічні кузови для харчових продуктів, самоскиди для сипучих матеріалів, платформи для негабаритів тощо).

Крім того, кузов виконує захисну функцію, оберігаючи вантаж від впливу зовнішнього середовища. Це стосується не лише атмосферних чинників (дош, сніг, вітер, сонячне випромінювання), але й пилу, вологи, перепадів температури, що особливо важливо при перевезенні чутливих, швидкопсувних або небезпечних вантажів. Кон-

структивні елементи кузова, зокрема теплоізоляція, ущільнення, вентиляція, забезпечують відповідні умови збереження вантажу протягом усього маршруту.

Ще однією важливою функцією кузова є його безпечність. Конструкція повинна запобігати зсуву, перекочуванню, деформації або пошкодженню вантажу під час руху, гальмування або маневрування. Наявність елементів фіксації, перегородок, поверхонь з підвищеним зчепленням і правильний розподіл маси сприяють підтриманню стійкості транспортного засобу. Особливо значним є забезпечення оптимального положення центру мас, що знижує ризики перекидання і підвищує керованість під час руху.

Крім того, тип кузова вантажного транспортного засобу має відповідати фізико-механічним і функціональним характеристикам вантажу. Його вибір визначається не лише формою і масою продукції, а й вимогами до умов перевезення. Наприклад, ізотермічні кузови застосовуються для транспортування продукції, що потребують підтримання певного температурного режиму, таких як харчові продукти або медикаменти. Самоскиди доцільні для перевезення сипучих і навалочних

матеріалів (щебінь, пісок, ґрунт), а платформи – для великогабаритного обладнання, будівельних конструкцій або техніки, яка не вміщується в стандартні кузови [9].

Тип кузова безпосередньо впливає на безпеку перевезень, оскільки визначає умови завантаження, кріплення та захисту вантажу в дорозі (рис. 1). Різновиди кузовів – тентовані, фургонні, ізотермічні, контейнерні тощо – мають різну конструктивну жорсткість, рівень захисту, а також стабільність під час руху. Наприклад, жорсткі фургони забезпечують надійний захист від зовнішніх впливів і пошкоджень у разі зіткнень, однак можуть мати підвищений центр мас, що негативно впливає на стійкість транспортного засобу, особливо під час маневрування або різкого гальмування. Тентовані кузови надають більшу гнучкість у завантаженні з боків або зверху, але поступаються в рівні механічного захисту. Ізотермічні кузови, попри високу захисну здатність, мають додаткову масу через теплоізоляційні матеріали, що впливає на вантажопідйомність і динамічні характеристики транспортного засобу [10, 11].

Під час інтенсивних маневрів – екстреного гальмування, раптової зміни смуги, маневрування



Рис. 1. Вплив типу кузова вантажного транспортного засобу на безпеку перевезень

на великій швидкості – саме жорсткість і міцність кузова істотно впливають на стійкість транспортного засобу. Надійна конструкція запобігає втраті керованості, заносу або перекиданню, що є особливо важливим при перевезенні важких, рідких або негабаритних вантажів. Жорсткий, збалансований кузов сприяє утриманню стабільного положення транспортного засобу під дією інерційних сил, а також підтриманню заданого розподілу маси за осями.

Стійкість конструкції вантажного транспортного засобу при аваріях та різких маневрах характеризується здатністю кузова зберігати свою цілісність та функціональність під впливом значних зовнішніх навантажень, забезпечуючи захист вантажу, водія та пасажирів [12]. Чинники, що зумовлюють збереження стійкості транспортного засобу, включають конструктивні особливості, розподіл маси, швидкість руху, характеристики підвісок та гуми, а також умови дорожнього покриття і зовнішні фактори (рис. 2). Конструкція кузова запроектована таким чином, щоб ефективно поглинати та рівномірно розподіляти енергію удару при зіткненнях, запобігаючи критичним деформаціям, які можуть призвести до пошкодження вантажу або травмування людей.

Крім того, у забезпеченні стійкості та безпеки значну роль відіграють спеціальні елементи пасивного захисту. До них належать деформаційні зони, що поглинають частину кінетичної енергії при ударі, посилені каркаси безпеки, які зберігають простір для водія та пасажирів, а також високоефективні системи кріплення вантажу. Останні є критично важливими, оскільки

ненадійно закріплений вантаж може зміщуватися (зміщувати центр мас), що збільшує ризик втрати стійкості [13].

Сучасні конструкції вантажних транспортних засобів дедалі частіше ґрунтуються на використанні високоміцних матеріалів та інженерних рішень, що дозволяють значно підвищити жорсткість і стійкість кузова без суттєвого збільшення загальної маси транспортного засобу [1, 6]. Це сприяє не лише підвищенню безпеки перевезень, а й покращенню динамічних характеристик транспортного засобу, зокрема керованості, гальмівної ефективності.

Одним із ключових чинників, що визначають стійкість і керованість вантажного автомобіля, є розташування центру мас [3, 14]. Оптимальне положення центру маси – на допустимій висоті та приблизно в центрі колісної бази, що дозволяє зменшити ризик перекидання під час проходження поворотів, екстреного гальмування або виконання різких маневрів. Неправильне розташування центру мас, наприклад, надмірне зміщення вперед, назад або убік, здатне негативно впливати на стабільність транспортного засобу [4]. Це може викликати передчасний знос шин, нерівномірне навантаження на підвіску, погіршення маневреності, а також збільшення ймовірності аварій, особливо на слизьких або нерівних дорогах. Високо розташований центр мас підвищує ризик перекидання, що особливо небезпечно під час перевезення негабаритних або важких вантажів. Щоб запобігти таким ситуаціям, необхідно дотримуватись технічних вимог до осевого навантаження, використовувати сертифіковані засоби кріплення

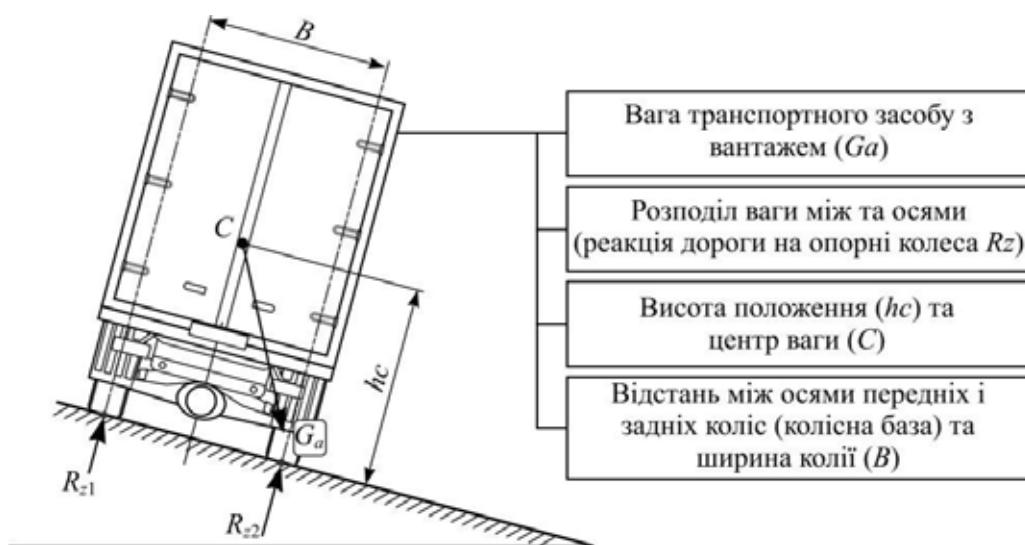


Рис. 2. Конструктивні чинники, що зумовлюють збереження стійкості транспортного засобу

вантажу, а також дотримуватись порядку завантаження кузова.

Контроль вантажопідйомності вантажного транспортного засобу є важливим заходом для забезпечення безпеки перевезень, ефективності роботи транспорту та захисту дорожньої інфраструктури, що нерідко порушують [15].

На першому етапі вагового контролю використовують технічну документацію транспортного засобу. У паспорті вказується максимально допустима вантажопідйомність і осьові навантаження, які є основою для правильного розрахунку при завантаженні. Водій або відповідальна особа повинні чітко дотримуватися цих параметрів.

Далі проводиться зважування транспортного засобу, яке може здійснюватися на стаціонарних або пересувних вагових комплексах – як на території підприємства, так і на автошляхових контрольних пунктах. Сучасні технології дають змогу здійснювати динамічне зважування в русі – використовуючи спеціальні сенсори, вмонтовані у дорожнє покриття і дозволяє автоматично визначити перевантаження без потреби зупинки транспортного засобу [16].

Не менш важливим є контроль маси вантажу під час завантаження. Для цього використовуються товарно-транспортні накладні, де вказується фактична маса вантажу, а також автоматизовані системи зважування, які встановлюються на складах або логістичних центрах. Завдяки цим даним можна звірити фактичне навантаження з допустимими значеннями.

Сьогодні на багатьох сучасних вантажівках встановлюються бортові системи зважування, які в реальному часі показують навантаження на кожну вісь. Дані можуть бути передані водієві, диспетчеру або інтегровані в телематичну систему підприємства.

З боку держави контроль вагових норм здійснює Укртрансбезпека, яка має повноваження

зупиняти транспортні засоби, проводити зважування та фіксувати порушення. В Україні діють чітко визначені обмеження щодо навантаження на осі та загальної маси, а їх порушення тягне за собою адміністративну відповідальність відповідно до чинного законодавства [17].

Окрім цього, водії та експедитори мають слідкувати не лише за дотриманням дозволеної маси, а й за правильним розподілом вантажу у кузові, аби уникнути перевантаження окремих осей.

Застосування описаних рішень підвищує безпеку перевезень, знижує ризики пошкодження транспорту та забезпечує відповідність законодавчим вимогам щодо навантаження.

Висновки. Кузов є ключовим елементом конструкції вантажного транспортного засобу, що визначає рівень безпеки, ефективність перевезення та можливість адаптації до різних умов експлуатації.

Вибір типу кузова має бути обґрунтований характеристиками вантажу, маршрутом та умовами експлуатації з урахуванням вимог безпеки.

Стійкість кузова вантажного автомобіля – це не лише характеристика міцності матеріалів, а й результат досконалої інженерної розробки, яка враховує динаміку руху, ймовірні аварійні сценарії та особливості експлуатації транспортного засобу в реальних умовах.

Застосування сучасних програмних комплексів (систем) для контролю вантажопідйомності та розподілу ваги вантажного транспортного засобу є ключовим чинником підвищення безпеки перевезень, ефективності логістики та дотримання нормативних вимог.

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці адаптивних конструктивних рішень кузова з урахуванням змінних експлуатаційних умов, типів вантажів та інтеграції інтелектуальних систем контролю стійкості й навантаження.

Список літератури:

1. Ghassemieh E. Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/13286>.
2. Golubović-Bugarski V., Petković S., Globočki-Lakić G. The effect of corrosion on a structural integrity and vehicle safety. *Mobility & Vehicle Mechanics*. 2021. Vol. 47. № 3, P. 49-62. URL: <http://dx.doi.org/10.24874/mvm.2021.47.03.05>.
3. Савойський О. Ю., Мельник Н. М. Дослідження впливу розміщення вантажу у кузові на стійкість та навантаження на осі вантажного транспортного засобу. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2024. № 4, С. 140-145. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.17>.
4. Vlkovský M., Neubauer J., Malíšek J., Michálek J. Improvement of Road Safety through Appropriate Cargo Securing Using Outliers. *Sustainability* 2021, 13, 2688. URL: <https://doi.org/10.3390/su13052688>.
5. Kulkarni H., Mandale M.B. Design and Analysis of Truck Load Body for Low Commercial Vehicle Platform. *Advances in Automobile Engineering*. 2022. Vol. 11, Iss. 2.

6. Uduma K. Innovations in Auto Safety Design, a Key to Quality Improvement. Technological Forecasting and Social Change. 2000. Vol. 64(2-3), P. 197-208. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1625\(00\)00085-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1625(00)00085-8).
7. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей : навч. посіб. / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. О. Огневий, Є. В. Смирнов. Вінниця : ВНТУ, 2017. 163 с.
8. Хітров І. О., Кристопчук М. Є., Никончук В. М. Експлуатаційні властивості транспортних засобів: навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2022. 176 с.
9. Хітров І. О. Аналіз конструкції кузова вантажного транспортного засобу. *Центральноукраїнський науковий вісник*. Технічні науки. Кропивницький. 2022. Вип. 7(38). Ч.2 С. 146-153. URL: [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/7\(38\)_II/21.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/7(38)_II/21.pdf).
10. Cargo Body Type. Mass Crash Report Manual: веб-сайт. URL: <https://masscrashreportmanual.com/large-truck-bus/cargo-body-type/>.
11. Кашканов В. А., Кашканов А. А., Варчук В. В. Організація автомобільних перевезень. Вінниця : ВНТУ. 2017. 139 с.
12. How Do Truck Rollovers Happen And What Follows. Avrek Law: веб-сайт. URL: <https://surl.li/mpvdxh>
13. Load Restraint Guide 2025. URL: <https://surl.li/vvrgeo>
14. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics, 7th ed., SAE International, Warrendale, PA, 1992. URL: <https://doi.org/10.4271/r-114>.
15. Bernard Jacob, Véronique Feypell-de La Beaumelle. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. IATSS Research. 2010. Vol. 34. Issue 1. P. 9-15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2010.06.003>.
16. WIM – системи моніторингу ваги вантажного транспорту у русі. Winncom Technologies: веб-сайт. URL: <https://surl.li/efbmtt>
17. Скільки тонн вантажу можна перевозити по Україні? АСД Центр: веб-сайт. URL: <https://surl.li/suygee>

Khitrov I.O. THE IMPACT OF STRUCTURAL FEATURES OF A FREIGHT VEHICLE BODY ON CARGO TRANSPORTATION SAFETY

The necessity of studying the structural features of cargo vehicle bodies is driven by their decisive influence on the safety of freight transportation amid increasing traffic intensity, rising operational requirements, and tighter control over technical condition. The article highlights the role of the vehicle body as a key component that ensures physical integrity, protects cargo from external factors, and affects the stability and maneuverability during operation. Modern approaches to enhancing body design safety are examined, and the relationship between body type, mass distribution, center of gravity position, and overall vehicle stability is established. It is revealed that design solutions influence not only the preservation of cargo but also the dynamic behavior of the vehicle, particularly during braking, cornering, and movement on uneven roads. The study provides a classification of body types (container, curtain-sided, vans, refrigerated, dump trucks, tankers) and their impact on safe transport conditions. Special attention is given to the structural stability in emergency situations and the use of passive safety elements, such as crumple zones, reinforcement frames, and cargo securing devices. The implementation of load capacity and weight distribution control systems is noted as especially relevant. The article identifies promising directions for further research, including the development of adaptive body structures tailored to variable operating conditions and cargo types, as well as the integration of intelligent systems to monitor vehicle stability and transport safety. The study holds practical value for designers, engineers, and logistics professionals. The proposed approaches can be effectively applied in the design of new cargo vehicle models and in the modernization of existing structures to meet current requirements for safety, efficiency, and environmental compliance. The findings may also serve as a useful educational resource for training specialists in the transport sector, fostering a systematic understanding of the relationship between body design and safety parameters.

Key words: truck, body structure, transportation safety, body types, center of mass, structural stability, freight transportation.

Дата надходження статті: 28.06.2025

Дата прийняття статті: 09.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025

Відомості про авторів

Абдулін М.З. – доктор технічних наук, професор кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Абрамова Л.С. – доктор технічних наук, професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Абрамова О.С. – кандидат економічних наук, доцент кафедри обліку та оподаткування Навчально-наукового інституту «Каразінський банківський інститут» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

Алексейк Є.С. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Науково-дослідної (експериментальної) лабораторії процесів в енергетичному обладнанні Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бандурка Л.М. – аспірантка відділу сенсорних пристроїв, систем та технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова Національної академії наук України

Баранюк О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Білевський П.С. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Бовсуновський О.А. – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій за дії кріотермічних і електромагнітних чинників Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України

Бондаренко Ю.А. – доктор філософії, Компанія «Оскар», Одеса

Борисенко Т.М. – головний конструктор Товариства з обмеженою відповідальністю «Агентства продажу активів»

Букет О.І. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бутенко О.С. – аспірант кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вишневий С.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вікович І.А. – доктор технічних наук, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Волошин В.С. – доктор технічних наук, професор, професор по кафедрі теплоенергетики Приазовського державного технічного університету

Волошин І.О. – магістр кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Галкін А.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Гой А.М. – кандидат фармацевтичних наук, доцент, доцент кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну, технічний директор Акціонерного товариства «Фармак»

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гурєва С.М. – доктор фармацевтичних наук, професор, професор кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну, начальник Відділу технологічної розробки Акціонерного товариства «Фармак»

Дмитрук К.С. – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Дьяконов О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Єднак А.Ю. – здобувач вищої освіти кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Єфімова В.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зеленський О.В. – асистент кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Іхсанов Ш.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Кануннікова Н.О. – доктор філософії, старший науковий співробітник кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Карєв А.І. – кандидат технічних наук, асистент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Касілов О.В. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Катін П.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кириллова В.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Кириллова О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Клавдієв В.П. – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Коваль М.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Коваль М.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Ковда Є.О. – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Козинка О.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Національного транспортного університету

Коновалюк О.Л. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корчинський В.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Котляров Є.І. – кандидат економічних наук, доцент, завідувач сектором економічної безпеки та енергозбереження Науково-дослідного центру Індустріальних проблем розвитку Національної академії наук України

Коценко О.А. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравець В.Ю. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедєв В.В. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Левандовський І.А. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри органічної хімії та технології органічних речовин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лифенко С.Е. – аспірант кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Лісовий В.М. – доктор філософії з хімічних технологій та інженерії, асистент кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну

Ловська А.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Мамренко О.С. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мельник О.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Судноводіння і морська безпека» Одеського національного морського університету

Мельник О.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Судноводіння та морська безпека» Одеського національного морського університету

Мельник Р.С. – доктор філософії, науковий співробітник Науково-дослідної (експериментальної) лабораторії процесів в енергетичному обладнанні Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Меркуленко Ю.С. – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Мещанин В.І. – доктор філософії, науковий співробітник вугільного відділу Державного підприємства «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)»

Михайлов Д.О. – здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Мініна Ю.О. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій

Мітіна Н.Б. – кандидат технічних наук, 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

Ніколаєнко Ю.Є. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Науково-дослідної (експериментальної) лабораторії процесів в енергетичному обладнанні Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Обшта А.Ф. – доктор технічних наук, професор кафедри «Захист інформації» Національного університету «Львівська політехніка»

Овчаренко С.В. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій

Онищенко С.П. – доктор економічних наук, професор, професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Павленко В.Я. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Павловський Д.О. – аспірант кафедри органічної хімії та технології органічних речовин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петрик Ю.М. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії, Одеса

Петров Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільної техніки Військової академії, Одеса

Пешко В.А. – кандидат технічних наук, доцент, виконуючий обов'язки завідувача кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пилипенко Т.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пікенін О.О. – старший викладач, старший викладач кафедри космічної інженерії Навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Поберій М.В. – аспірант Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Політикін М.В. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Присяжнюк А.М. – здобувач доктора філософії кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Приходько В.Е. – аспірант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Птиця Г.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри організації та безпеки дорожнього руху Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Пустовойтов П.Є. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Рачинський А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рибін А.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Риндюк Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Руденко О.І. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, технічний директор Науково-навчального центру декарбонізації енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савченко М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Самчук Г.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Скрипін В.С. – кандидат технічних наук, асистент кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Сокол Г.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Солодовнік Т.В. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Столяренко Г.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Сущенко Р.В. – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Тимченко О.С. – аспірант Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Ткаленко І. – доктор філософії, технічний директор компанії AMCOM GROUP LLC, США

Ткаченко М.В. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Усов І.Л. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федоренко В.В. – аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну, інженер-технолог Технологічної лабораторії Відділу технологічної розробки Акціонерного товариства «Фармак»

Фомін О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Національного транспортного університету

Харитонов Ю.М. – доктор технічних наук, професор Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Хітров І.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національного університету водного господарства та природокористування

Хмара П.П. – провідний інженер, виконуючий обов'язки завідувача лабораторією кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чайковський С.Ю. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Черноусенко О.Ю. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чигиринець О.Е. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чорний О.О. – кандидат технічних наук, старший інженер-технолог Технологічної лабораторії Відділу технологічної розробки Акціонерного товариства «Фармак»

Шахбазов І.О. – аспірант 2 курсу групи ТУ-31ф кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шелешей Т.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теплової та альтернативної енергетики Інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Штефан В.В. – доктор технічних наук, професор кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Шульга І.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, завідувач коксового відділу Державного підприємства «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)»

Явіся В.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яременко В.В. – аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну, начальник Технологічної лабораторії Відділу технологічної розробки Акціонерного товариства «Фармак»

НОТАТКИ

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 4 2025

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

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. 34,67. Ум. друк. арк. 39,06. Зам. № 0925/730

Підписано до друку 12.09.2025. 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.