

**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 33 (72) № 4 2022**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2022

## 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 інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**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 № 19 від 29.07.2022 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) 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](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2022

## ЗМІСТ

### ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

<b>Бернацький А.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Лукашенко В.А., Данилейко О.О., Набок Т.М., Бондарєва В.І., Шамсутдінова Н.О.</b> ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ОПЛАВЛЕННЯ НА ЗМІНУ СТРУКТУРИ ПОКРИТТІВ ІЗ СПЛАВІВ, ЩО САМОФЛЮСУЮТЬСЯ.....	1
<b>Погребова І.С., Янцевич К.В.</b> СТРУКТУРА ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ЗА УЧАСТЮ ХРОМУ ТА КРЕМНІЮ.....	6

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<b>Топчій Н.В.</b> ПОРТАТИВНІ ТВЕРДОМІРИ: ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ.....	11
<b>Шорнікова С.В., Кузьменко Т.М.</b> ВИБІР МАТЕРІАЛУ КЛИНКА ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ХОЛОДНОЇ ЗБРОЇ.....	16

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

<b>Бодак Є.Є., Лебедев Д.Ю.</b> РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.....	21
<b>Гарист А.В.</b> АНАЛІЗ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ VLUETOOTH.....	27
<b>Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Куляс Р.О., Шпильовий О.О.</b> ГНУЧКА ДВОХСМУГОВА LTE АНТЕНА ДЛЯ РАДІОЧАСТОТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ БЕЗДРОТОВИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ І СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	32

### ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

<b>Батюк С.Г., Лядишев Д.К.</b> ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	39
<b>Батюк С.Г., Лядишев Д.К.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	48
<b>Блінцов В.С., Грудініна Г.С., Буруніна Ж.Ю., Надточий А.В.</b> УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА.....	56
<b>Вдовичин Т.Я., Лазурчак Л.В.</b> ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ПОШУКОВИХ СИСТЕМ ЯК ЗАСІБ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	66
<b>Волощук В.А., Жученко Л.К., Коротинський А.П.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.....	72
<b>Говорущенко Т.О., Гнатчук Є.Г.</b> ПРАВИЛА ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО НЕОБХІДНОСТІ ТА МОЖЛИВОСТІ ВАКЦИНАЦІЇ ВІД COVID'19.....	79
<b>Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Ківа І.Л.</b> ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ В ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛАХ.....	86
<b>Зіноватна С.Л., Тішакін М.В., Буджеліда А.Н.</b> ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРОЦЕСІВ.....	92

<b>Кондратець В.О., Мелешко Є.В., Мацуї А.М., Абашина А.А.</b> СТАБІЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РІЗНОРОЗМІРНОГО КУЛЬОВОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА РЕАЛІЗАЦІЄЮ АЛГОРИТМІВ ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО СТАНУ.....	97
<b>Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Явіся В.С., Гуйда О.Г., Новіков В.І., Сушин І.О.</b> МОДЕЛІ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ВІД МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ В АЛГОРИТМАХ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ УСКЛАДНЕНИХ ТЕХНОГЕННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ.....	103
<b>Oleshchenko L.M., Movchan K.O., Guida O.G., Novak D.S.</b> SOFTWARE METHODS FOR ANALYSIS AND FORECASTING SUSTAINABLE DEVELOPMENT INDICATORS USING PYTHON TOOLS.....	113
<b>Сазонов А.Ю., Чередниченко В.І., Черепанська І.Ю.</b> МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ ТА СТАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОБІЛЬНОГО КРОКУЮЧОГО ЕВАКУАЦІЙНОГО РОБОТА.....	121
<b>Хлопенко І.М.</b> РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СУДНОВОГО ДВОСТУПІНЧАСТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА ПРИ ВЕКТОРНОМУ КЕРУВАННІ З РОБАСТНИМ РЕГУЛЯТОРОМ В КАНАЛІ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ.....	129
<b>ЕНЕРГЕТИКА</b>	
<b>Безродний М.К., Пригула Н.О., Мішко П.І.</b> ОПТИМАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМІННИКА ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ ПРИРОДНОЇ ВОДИ І ҐРУНТУ В ТЕПЛОНАСОСНИХ СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ.....	136
<b>Босий М.В.</b> ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА НА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТОМУ РОБОЧОМУ ТІЛІ ПРОПАНИ.....	144
<b>Купін А.І., Осадчук Ю.Г., Савицький О.І., Шерстньов Ю.В.</b> ДО ПИТАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	149
<b>Lobodzinskiy V.Yu., Buryk M.P., Spinul L.Yu., Chybelis V.I., Illina O.A.</b> FEATURES OF SMART GRID TECHNOLOGIES INTRODUCTION IN THE ENERGY INDUSTRY.....	160
<b>Олійник Ю.С.</b> АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	167
<b>Сірий О.А., Кобилянська О.О.</b> CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ СУМІШІ МЕТАН-ВОДЕНЬ В СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ ПОЛУМ'Я.....	172
<b>Усов А.В., Слободянюк М.В.</b> ВПЛИВ ФАКТОРУ ТИСКА НА ПРОЦЕС ПАЛИВОПОДАЧІ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ.....	181
<b>РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН</b>	
<b>Рудаков Д.В., Інкін О.В.</b> ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРІОДИЧНОГО ВОДОВІДБОРУ ІЗ ЗАТОПЛЕНИХ ШАХТ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЇХ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ.....	189
<b>Sadovenko I.O., Zahrytsenko A.M., Tymoshchuk V.I., Dereviahina N.I.</b> HYDROMECHANICAL PARAMETERS OF SAFE COAL SEAM EXTRACTION WITHIN A ZONE OF FLOODED MINE WORKINGS EFFECT.....	196
<b>ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ</b>	
<b>Голуб Л.С., Ващенко Ю.М.</b> АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОДРІБНЕНИХ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ.....	205

<b>Grytsenko O.M., Baran N. M., Dulebová L., Berezhnyy B.-V.V.</b> THE EFFECT OF THE FILLER NATURE ON THE PROPERTIES OF HYDROGELS BASED ON POLYVINYLPIRROLIDONE COPOLYMERS.....	211
<b>Дістанов В.Б., Мироненко Л.С., Кадочкіна В.В., Школьнікова Т.В.</b> УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ 4-МОРФОЛІНОНАФТАЛІМІДІВ.....	217
<b>Єфімова В.Г., Пилипенко Т.М.</b> ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЦЕПТУРНИХ СКЛАДІВ НОВИХ ВИДІВ ТУАЛЕТНОГО МИЛА.....	225
<b>Жданюк Н.В., Лешенко П.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ, ТЕРМІЧНИХ ТА СОРБЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОНТМОРІЛОНІТУ З НАНЕСЕНИМ ШАРОМ НАНОРОЗМІРНОГО НУЛЬ-ВАЛЕНТНОГО ЗАЛІЗА.....	230

## **ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

<b>Бажай-Жежерун С.А., Антонюк М.М., Башта А.О.</b> РОЗРОБЛЕННЯ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ М'ЯСО-РОСЛИННИХ КОНСЕРВІВ ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ.....	236
<b>Каменева Н.В., Ткаченко О.Б., Манолі Т.А., Тараненко О.Г.</b> ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИН, ЯКІ НЕ МІСТЯТЬ СІРКИ, ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ СЕНСОРНОГО АНАЛІЗУ.....	241
<b>Кирпиченкова О.М., Литвинець Л.Ф.</b> СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ВИКОРИСТАННЯ ПЛОДІВ БУЗИНИ ЧОРНОЇ У ВИРОБНИЦТВІ РЕСТОРАННОЇ ПРОДУКЦІЇ.....	248

## **ТРАНСПОРТ**

<b>Кисельов В.Б., Лановий О.Т., Кошарний О.М.</b> МАКРОЕКОНОМІЧНИЙ ВПЛИВ МЕРЕЖИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ.....	253
<b>Мельник О.М., Онищенко О.А., Васалатій Н.В., Корякін К.С., Пуляєв І.О., Щенявський Г.С.</b> ТЕХНОЛОГІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ПРОЦЕСІ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ МОРЕПЛАВСТВА.....	260
<b>Miedviedieva N.A.</b> CONSEQUENCES OF COVID-19 AND WARS IN UKRAINE ON CHANGES IN THE ACTIVITIES OF AIR CARRIERS.....	266
<b>Стрелко О.Г., Торопов Б.І., Грушевська Т.М., Войцехович В.С., Поповичук Т.О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ НА ПРОПУСКНУ СПРОМОЖНІСТЬ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛІВ.....	271
<b>Фалович Н.М., Фалович В.А., Шевчук О.С., Попович П.В., Чорна О.В.</b> ДЕРЖАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ.....	278
<b>Фомін О.В., Ловська А.О.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ ДВОХСЕКЦІЙНОГО.....	283

## **БУДІВНИЦТВО**

<b>Коверніченко Л.М., Сізий Б.С.</b> ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДІЛИ В ПІДГОТОВЦІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	288
<b>Корнило І.М.</b> СИСТЕМА МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЖИТЛОВОЇ НЕРУХОМОСТІ.....	293
<b>Луценко Ю.В., Добряк Д.О., Кравченко Н.В., Цимбалістий С.З., Савченко О.В.</b> ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ ПИЛОПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ У ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ.....	299
<b>Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В., Свірський В.В.</b> ПРО СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО КЛАСИФІКАЦІЇ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ПОЖЕЖНИКІВ, ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ, МЕТОДІВ І ПРОЦЕДУР ЇХ ОЦІНЮВАННЯ.....	304

<b>Чичуліна К.В.</b> АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АРМОВАНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК.....	312
<b>Shyshkina O.O.</b> APPLICATION OF GYPSUM IN MICELLAR CATALYSIS OF PORTLAND CEMENT HYDRATION REACTIONS.....	321
<b>ЕЛЕКТРОНІКА</b>	
<b>Ліневич Я.О., Коваль В.М., Душейко М.Г., Лакида М.О.</b> СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КРЕМНІЄВИХ 1D НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В СЕНСОРАХ ОСВІТЛЕННОСТІ.....	327
<b>ПЕРСОНАЛІЇ</b>	
<b>Шимчак Пьотр, Блінцов В.С., Бойко А.О., Буруніна Ж.Ю.</b> МИХАЙЛО ДОЛІВО-ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ: ОСОБИСТІСТЬ СВІТОВОГО МАСШТАБУ (до 160-річчя від дня народження науковця та 130-річчя першої передачі електроенергії трифазним струмом).....	338
<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....</b>	<b>352</b>

# CONTENTS

## MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

**Bernatskyi A.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Lukashenko V.A., Danyleiko O.O., Nabok T.M., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O.**

INFLUENCE OF THE LASER SURFACE ALLOYING PARAMETERS ON THE CHANGES  
IN THE STRUCTURE OF THE COATINGS MADE OUT OF SELF-FLUXING ALLOYS..... 1

**Pogrebova I.S., Iantsevitch C.V.**

STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF DIFFUSION COATINGS  
WITH CHROME AND SILICON.....6

## MACHINE SCIENCE

**Topchii N.V.**

PORTABLE HARDNEZERS: PRINCIPLES OF OPERATION AND ANALYSIS  
OF THE CURRENT STATUS OF METHODS AND INSTRUMENTS  
FOR MEASURING HARDNESS.....11

**Shornikova S.V., Kuzmenko T.M.**

CHOICE OF MATERIAL CLICK WHEN MANUFACTURING MOLDED WEAPONS..... 16

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Bodak Ye.Ye., Lebedev D.Yu.**

DEVELOPMENT OF ENERGY CONTROL SYSTEM FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES..... 21

**Haryst A.V.**

BLUETOOTH TECHNOLOGY VULNERABILITY ANALYSIS..... 27

**Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Kulias R.O., Shpylovyi O.O.**

FLEXIBLE TWO-BAND LTE ANTENNA FOR RADIO-FREQUENCY ACCESS  
TECHNOLOGIES FOR WEARABLE DEVICES OF WIRELESS  
INFO-COMMUNICATION AND SENSOR NETWORKS.....32

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Batiuk S.G., Liadyshev D.K.**

SIMULATION MODELING OF HEAT ENERGY AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEXES.... 39

**Batiuk S.G., Liadyshev D.K.**

SIMULATION OF FILTRATION IN HEAT AND POWER SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL..... 48

**Blintsov V.S., Hrudinina H.S., Burunina Z.Yu., Nadtochy A.V.**

IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED CONTROL  
OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE.....56

**Vdovychyn T.Ya., Lazurchak L.V.**

DESIGN OF INFORMATION AND SEARCH SYSTEMS AS A MEANS  
OF USING MODERN TECHNOLOGIES..... 66

**Voloshchuk V.A., Zhuchenko L.K., Korotynskiy A.P.**

RESEARCH OF THERMAL REGIMES OF THE PROCESS OF BURNING  
OF CARBON PRODUCTS..... 72

**Hovorushchenko T.O., Hnatchuk Ye.H.**

RULES AND METHOD OF SUPPORTING THE DECISION-MAKING ON THE NEED  
AND POSSIBILITY OF COVID'19 VACCINATION ON LEGAL GROUNDS.....79

**Zdorenko V.H., Barylko S.V., Lisovets S.M., Kiva I.L.**

IMPROVING RELIABILITY OF DETERMINATION OF SPEED  
OF ACOUSTIC OSCILLATIONS IN SHEET MATERIALS..... 86

**Zinovatna S.L., Tishakin N.V., Budzhelida A.N.**

APPLICATION OF PARALLEL COMPUTING TECHNOLOGIES FOR ORGANIZATION  
OF PROCESS INTERACTION.....92

<b>Kondratets V.O., Meleshko Ye.V., Matsui A.M., Abashina A.A.</b> STABILIZATION OF THE OPTIMUM DIFFERENT-SIZED BALL LOADING OF A DRUM MILL BY THE IMPLEMENTATION OF ALGORITHMS FOR ASSESSING ITS CONDITION.....	97
<b>Lysenko O.I., Chumachenko S.M., Yavisya V.S., Guida O.G., Novikov V.I., Sushyn I.O.</b> MODELS USING MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR ALGORITHMS EVALUATING AND FORECASTING THE STATE OF ECOLOGICAL SYSTEMS COMPLICATED BY MAN-MADE LOADS.....	103
<b>Oleshchenko L.M., Movchan K.O., Guida O.G., Novak D.S.</b> SOFTWARE METHODS FOR ANALYSIS AND FORECASTING SUSTAINABLE DEVELOPMENT INDICATORS USING PYTHON TOOLS.....	113
<b>Sazonov A.Yu., Cherednychenko V.I., Cherepanska I.Yu.</b> SIMULATION OF KINEMATIC AND STATIC PARAMETERS OF MOBILE WALKING RESCUE ROBOT.....	121
<b>Khlopenko I.M.</b> CALCULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A MARINE TWO-STAGE RECIPROCATING COMPRESSOR UNDER VECTOR CONTROL WITH A ROBUST CONTROLLER IN THE FLUX-LINKAGE CHANNEL.....	129

## POWER ENGINEERING

<b>Bezrodny M.K., Prytula N.O., Mishko P.I.</b> OPTIMAL CHARACTERISTICS OF A HEAT EXCHANGER FOR THE USE OF HEAT OF NATURAL WATER AND SOIL IN HEAT PUMP HEATING SYSTEMS.....	136
<b>Bosyi M.V.</b> ENERGY EFFICIENCY OF THE AIR HEAT PUMP ON ENVIRONMENTALLY CLEAN PROPANE WORKING BODY.....	144
<b>Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I., Sherstnov Yu.V.</b> ENHANCEMENT OF THE VOLTAGE SUPPLY QUALITY OF SUBSTATIONS AT MINING AND PROCESSING PLANTS.....	149
<b>Lobodzinskiy V.Yu., Buryk M.P., Spinul L.Yu., Chybelis V.I., Illina O.A.</b> FEATURES OF SMART GRID TECHNOLOGIES INTRODUCTION IN THE ENERGY INDUSTRY.....	160
<b>Oliinyk Yu.S.</b> ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS.....	167
<b>Siryi O.A., Kobylanska O.O.</b> ANALYSIS OF CFD-MODEL OF METHANE-HYDROGEN COMBUSTION PROCESS IN A JET-NICHY GAS BURNER.....	172
<b>Usov A.V., Slobodianiuk M.V.</b> INFLUENCE OF THE PRESSURE FACTOR ON THE FUEL SUPPLY PROCESS SHIP DIESEL.....	181

## RESOURCE DEVELOPMENT

<b>Rudakov D.V., Inkin O.V.</b> A RATIONALE OF PERIODIC WATER WITHDRAWAL FROM FLOODED MINES FOR UTILIZATION OF THEIR GEOTHERMAL POTENTIAL.....	189
<b>Sadovenko I.O., Zahrytsenko A.M., Tymoshchuk V.I., Dereviahina N.I.</b> HYDROMECHANICAL PARAMETERS OF SAFE COAL SEAM EXTRACTION WITHIN A ZONE OF FLOODED MINE WORKINGS EFFECT.....	196

## CHEMICAL TECHNOLOGY

<b>Holub L.S., Vashchenko Yu.N.</b> CURRENT ISSUES OF USE OF CRUSHED PRODUCTS OF PROCESSING OF SECONDARY RAW MATERIALS.....	205
---	-----



<b>Grytsenko O.M., Baran N.M., Dulebová L., Berezhnyy B.-V.V.</b> THE EFFECT OF THE FILLER NATURE ON THE PROPERTIES OF HYDROGELS BASED ON POLYVINYLPIRROLIDONE COPOLYMERS.....	211
<b>Distanov V.B., Myronenko L.S., Kadochkina V.V., Shkolnikova T.V.</b> IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING 4-MORPHOLINONAPHTHALIMIDES.....	217
<b>Yefimova V.G., Pilipenko T.M.</b> REPAIR OF RECIPE WAREHOUSES IN NEW VIEWS OF TOILET SOAP.....	225
<b>Zhdanyuk N.V., Leshchenko P.V.</b> STUDY OF THE STRUCTURE, THERMAL AND SORPTION PROPERTIES OF MONTMORILLONITE WITH A DEPOSITED LAYER OF NANO-SIZED ZERO-VALENT IRON.....	230

## **TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY**

<b>Bazhay-Zhezherun S.A., Antoniuk M.M., Bashta A.O.</b> DEVELOPMENT OF THE COMPONENT COMPOSITION OF MEAT-VEGETABLE TINNED FOOD OF HEALTH IMPROVING USAGE AND RESEARCH OF THEIR QUALITATIVE INDICATORS.....	236
<b>Kameneva N.V., Tkachenko O.B., Manoli T.A., Taranenko O.G.</b> COMPARATIVE CHARACTERIZATION OF WINES THAT DO NOT CONTAIN SULFUR, BY MEANS OF SENSORY ANALYSIS METHODS.....	241
<b>Kyrpichenkova O.M., Litvinets L.F.</b> MODERN DIRECTIONS OF USE OF BLACK ELDER FRUIT IN THE MANUFACTURE OF RESTAURANT PRODUCTS.....	248

## **TRANSPORT**

<b>Kiselyov V.B., Lanoyi A.T., Kosharnyi O.M.</b> MACROECONOMIC IMPACT OF UKRAINE'S ROAD NETWORK.....	253
<b>Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Vasalati N.V., Koryakin K.S., Pulyaev I.O., Shcheniavskiy G.S.</b> INFORMATIONAL INTERACTION TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF IMPROVING MARITIME SAFETY.....	260
<b>Miedvedieva N.A.</b> CONSEQUENCES OF COVID-19 AND WARS IN UKRAINE ON CHANGES IN THE ACTIVITIES OF AIR CARRIERS.....	266
<b>Strelko O.H., Toropov B.I., Hrushevska T.M., Voitsehovich V.S., Popovychuk T.O.</b> RESEARCH OF THE INFLUENCE OF PASSENGER FLOWS ON THE CAPACITY OF TRANSFER NODES.....	271
<b>Falovych N.M., Falovych V.A., Shevchuk O.S., Popovich P.V., Chorna O.V.</b> GOVERNMENT REGULATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY ON MOTOR TRANSPORT.....	278
<b>Fomin O.V., Lovska A.O.</b> DYNAMICAL MODELLING OF THE CONTINUOUS LOADING OF A DOUBLE SECTION TANK WAGON.....	283

## **CONSTRUCTION**

<b>Kovernichenko L.M., Syzyi B.S.</b> TECHNOLOGICAL LOCATIONS IN THE PREPARATION OF BUILDING MATERIALS.....	288
<b>Kornylo I.M.</b> SYSTEM OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF RESIDENTIAL REAL ESTATE.....	293
<b>Lutsenko Yu.V., Dobriak D.O., Kravchenko N.V., Tsymbalistiy S.Z., Savchenko O.V.</b> PECULIARITIES OF CALCULATION OF EXCESS EXPLOSION PRESSURE OF DUST-AIR MIXTURES IN PRODUCTION PREMISES.....	299

<b>Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V., Svirskiy V.V.</b> ON MODERN REQUIREMENTS FOR CLASSIFICATION OF MEANS OF INDIVIDUAL PROTECTION OF FIREFIGHTERS, QUALITY INDICATORS, METHODS AND PROCEDURES FOR THEIR EVALUATION.....	304
<b>Chichulina K.V.</b> ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH RESULTS OF REINFORCED WOODEN I-BEAMS.....	312
<b>Shyshkina O.O.</b> APPLICATION OF GYPSUM IN MICELLAR CATALYSIS OF PORTLAND CEMENT HYDRATION REACTIONS.....	321

## **ELECTRONICS**

<b>Linevych Ya.O., Koval V.M., Dusheiko M.G., Lakyda M.O.</b> SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF SILICON 1D NANOSTRUCTURES FOR APPLICATION IN LIGHT SENSORS.....	327
--	-----

## **PERSONALIA**

<b>Szymczak P., Blintsov V.S., Boyko A.O., Burunina Zh.Yu.</b> MYKHAYLO DOLIVO-DOBROVOLSKY: WORLDWIDE PERSONALITY (To the 160th anniversary of the scientist's birth and the 130th anniversary of the first transmission of electricity by three-phase current).....	338
---	-----

<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS.....</b>	352
---------------------------------------	-----

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.793.09

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/01>

**Бернацький А.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Сіора О.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Соколовський М.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Лукашенко В.А.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Данилейко О.О.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Набок Т.М.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Бондарєва В.І.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Шамсутдінова Н.О.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ОПЛАВЛЕННЯ НА ЗМІНУ СТРУКТУРИ ПОКРИТТІВ ІЗ СПЛАВІВ, ЩО САМОФЛЮСУЮТЬСЯ

*Традиційна технологія отримання покриттів з порошкових самофлюсуючих сплавів передбачає їх напилювання на попередньо підготовлену поверхню, що обробляється, з подальшою фінішною механічною обробкою. При необхідності після напилювання проводять оплавлення шляхом нагрівання до температури, що відповідає інтервалу кристалізації даного сплаву, та подальшого повільного охолодження. Однак при цьому через застосування теплових джерел з малою концентрацією енергії виникає низка негативних явищ: об'ємний розігрів оброблюваних деталей до високих температур; посилення процесів відпуску та рекристалізації; розміцнення матеріалу основи та значні температурні деформації. Усе це значно звужує область використання цієї технології і змушує шукати нові способи оплавлення покриттів. Одним із яких є використання потужних технологічних лазерів. Експериментально встановлено, що при лазерному оплавленні газотермічних покриттів, внаслідок надвисоких швидкостей нагріву та охолодження, може бути усунуто ряд недоліків, обумовлених специфікою фазо- та структуроутворення матеріалів при нанесенні, а саме: пороутворення, мала міцність зчеплення покриття з основою нерівномірність по товщині, хімічна та структурна неоднорідність тощо. Встановлені залежності між технологічними параметрами лазерного випромінювання та розмірами оплавлених шарів. при лазерному оплавленні покриттів із самофлюсуючих сплавів ПГ-10Н-01 та ПГ-12Н-01 на сталях та міді наявні деякі спільні особливості структуроутворення, пов'язані з енерговкладом процесу. Визначальним фактором при оплавленні газотермічних покриттів із самофлюсуючих сплавів лазерним випромінюванням, є енерговклад, при збільшенні якого підвищується однорідність та мілкодисперсність структури оплавлених шарів, зникають такі дефекти як тріщини та пори. Збільшення погонної енергії підвищує однорідність та дрібнодисперсність структури оплавлених шарів,*

усуваються такі дефекти як тріщини та пори. При оплавленні покриттів на мідній основі застосування лазерного випромінювання в якості джерела нагріву дозволяє уникнути додаткових технологічних операцій, а саме – попереднього підігріву зразків і нанесення підшару.

**Ключові слова:** покриття, самофлюсуючися сплави, лазерне оплавлення, структура, зміни, властивості, дефекти.

### Постановка проблеми

Питанням технології та якості нанесення газотермічних покриттів приділялася значна увага протягом останніх років [1–3]. Провідне місце у розробках такого роду відводилося, головним чином, плазовим та мікроплазовим технологіям. Незважаючи на певні успіхи, досягнуті в цих питаннях, напилюванні плазовими методами покриття зберігають низку основних недоліків. Насамперед це стосується адгезійної міцності та пористості. І якщо недостатня адгезійна міцність може призвести до руйнування покриттів на деталях, що працюють в умовах ударних навантажень, то висока пористість може викликати відшарування будь-якого покриття, тому що у цьому випадку можливе окислення як покриття, так і підкладки. Для усунення зазначених недоліків після напилювання покриттів проводять їхнє оплавлення. Однак при цьому через застосування теплових джерел з малою концентрацією енергії виникає ряд негативних явищ: об'ємний розігрів оброблюваних деталей до високих температур; посилення процесів відпустки та рекристалізації; розміщення матеріалу основи та значні температурні деформації. Усе це значно звужує область використання цієї технології і змушує шукати нові способи модифікації покриттів. Одним із таких методів є використання потужних технологічних лазерів [4–7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Лазерне оплавлення напиляних покриттів було запропоновано з метою підвищення міцностних якостей напиляних покриттів, шляхом усунення макродефектності структури як усього покриття, так й контактної зони між покриттям та основою [4–7]. Встановлено, що лазерна обробка покриттів зменшує кількість пор і окислів, суттєво збільшує адгезійну міцність покриттів. За рахунок зміни параметрів променя може регулюватися глибина проплавлення шару, вона може бути дорівнює товщині попередньо нанесеного шару, може перевершувати її й розплавляти частина основи. Висока швидкість нагрівання при лазерному оплавленні дозволяє зберігати вихідну (у тому числі дрібнозернисту) структуру матеріалу покриття.

Однак, наведені у роботах [4–7] дані по структурі, фазовому складу та мікротвердості навіть для одного типу самофлюсуючого порошку не

співпадають, та навіть протиречуть один одному. Так в роботі [4] спостерігається структура нікелевої матриці з дисперсною та рівномірною структурою. Дендрити являють собою  $\gamma$ -твердий розчин нікелю, а між гілками дендритів  $\gamma$ -твердого розчину кристалізується тонкоразгалужена бори дна евтектика. В роботі [5], навпаки, підкреслюється неоднорідність структури, пов'язана з різними термічними режимами кристалізації, які мають місце в ванні розплав, яку утворює лазерний промінь, та описуються три характерні зони, які відрізняються формою, структурою та розмірами карбідних включень. Мілко кристалічна неоднорідна структура, обумовлена перемішуванням, з різними формами та розподілу зміцнюючи ми фазами описана в роботі [7]. При аналізі фазового складу рентгеноструктурними методами, основна фазова складова досліджуваних покриттів –  $\gamma$ -твердий розчин нікелю – ідентифікується в усіх роботах. А от що стосується інших фаз, то в літературі наведені дуже відрізняючися дані о їх якісному та кількісному складі. Наприклад, у роботі [4] підкреслюється наявність в основному боридів нікелю  $Ni_3B$ , хрому, та карбідів хрому  $Cr_7C_3$  та  $Cr_3C_2$ . В роботі [5] після лазерного оплавлення покриття виявлено наявність лише  $Ni_3B$ , в якості другої фази відмічений  $Ni_3B$ . Проведений в [7] аналіз дозволив надійно ідентифікувати такі фази як  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_3C_2$  та  $CrB$ . Пов'язуючи значення мікротвердості зі ступенем пересиченості  $\gamma$ -твердого розчину, автори робіт [4; 5] роблять протилежні висновки, порівнюючи мікротвердість покриттів оплавлених лазером та газовим полум'ям.

Така невизначеність структурного та фазового складу призводить до протилежних висновків по відношенню до механізмів формування та мікротвердості оплавлених лазерним випромінюванням покриттів.

**Постановка завдання.** Структурні дослідження, уточнення фазового складу та оцінка механічних характеристик покриттів з самофлюсуючихся сплавів, оплавлених лазерним випромінюванням, залишаються актуальною науковою проблемою, як з точки зору більш надійного прогнозування експлуатаційних характеристик покриттів, так й з ціллю більш глибокого поняття фундаментальних процесів, що відбуваються в зоні дії лазерного випромінювання.

**Виклад основного матеріалу**

За допомогою аргонодугової плазмової установки УПУ-8М, були нанесені покриття з сплавів, що самофлюсуються ПГ-10Н-01 і ПГ-12Н-01 на зразки зі сталей Ст3, 10ХСНД, 65Г, 38ХНЗМФА і міді М1. Товщина нанесеного шару варіювалася в межах 0,3...0,8 мм.

Як джерело лазерного випромінювання для оплавлення напилених шарів, використовували Nd:YAG-лазер моделі DY044 (Rofin Sinar, Німеччина) з довжиною хвилі  $\lambda=1,06$  мкм. Обробка зразків проводилася як серед захисного газу (аргону), і без захисту.

В результаті експериментів на зразках встановлено, що в діапазоні потужності лазерного випромінювання Nd:YAG-лазера DY 044 від 1 до 3 кВт, оптимальний діаметр плями випромінювання на оплавленій поверхні прямо пропорційний потужності лазерного випромінювання і становить 1,5 мм на 1 кВт для швидкостей процесу 0,5...5 м/хв. Відповідний діапазон щільності потужності випромінювання  $W_p=(0,5...5,0)\times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Час існування ванни розплаву при цьому може змінюватись від 0,03 до 0,3 с.

Зазначена залежність у даному діапазоні дозволяє за один прохід отримувати на сталевих та мідних зразках якісно оплавлені шари, які можна порівняти за товщиною з попередньо напиленими. Термічний вплив на зразок, що оплавляється, при цьому мінімально, розмір перехідної зони становить 10...30 мкм. Подальше зменшення перехідної зони, як показали експерименти, може призвести до відшарування оплавленого покриття. Збільшення перехідної зони не доцільно, оскільки призводить до підвищення вмісту металу основи в модифікованому покритті, ускладнює отримання поверхневих шарів із заданими фізико-хімічними властивостями.

Для порівняння з лазерною обробкою покриття оплавляли плазмотронами прямої та непрямої дії, а також газополум'яним пальником.

Оплавлення покриттів плазмотроном непрямої дії проводили на установці УПУ-8М. Визначено, що покриття, нанесені на сталеві зразки, оплавлялися без видимих дефектів, одержувана поверхня мала гладку однорідну фактуру з характерним металевим блиском. Покриття, нанесені на мідні зразки, не оплавлялися через низький тепловий ККД плазмотронів непрямої дії, а також великий коефіцієнт теплопровідності міді. Покриття на мідних зразках вдалося оплавити плазмотроном прямої дії на установці УПРП-200, нанісши підшар із кремнію та застосувавши попередній підгрів зразків до 400...500 °С.

Оплавлення покриттів газополум'яним способом проводили на установці Eurojet. Покриття на сталевих зразках були оплавлені газополум'яним способом без видимих дефектів, одержувана поверхня була гладкою і мала вигляд, аналогічний виду оплавлених плазмотроном непрямої дії поверхонь. Покриття, нанесені на мідні зразки, цим способом оплавити не вдалося.

При лазерному оплавленні покриттів із сплавів, що самофлюсуються, ПГ-10Н-01 і ПГ-12Н-01 на сталях і міді спостерігаються деякі загальні особливості структуроутворення, пов'язані з енерговкладом процесу.

За структурою та властивостями отриманих зразки можна розділити на чотири групи, які відповідають чотирьом рівням погонної енергії: низький (10...50 кДж/м), середній (50...200 кДж/м), високий (200...400 кДж/м) та критичний (понад 400 кДж/м).

Мікроструктури матеріалів першої групи (10...50 кДж/м) характеризується відсутністю безперервного сліду оплавлення. Глибина локальних місць оплавлення сягає 150...200 мкм. На більшій глибині зберігається вихідна структура і пористість лише на рівні 15...20 %. Адгезійний зв'язок слабкий, спостерігаються мікротріщини по межі розділу основа-покриття. Розподіл мікротвердості має великий розкид (HV0,05-200...550), що з високою гетерогенністю покриттів. Дифузія елементів на межі розділу «покриття-основа» відсутня, не виявлено також зону термічного впливу (ЗТВ) у матеріалі основи.

При середньому рівні погонної енергії (50...200 кДж/м), на блискучій оплавленій поверхні покриття спостерігаються тріщини. У певній галузі режимів обробки розплавлене покриття кристалізується на не оплавленій поверхні основного металу у вигляді окремих крапель. Аналіз мікроструктур показує, що середні значення погонної енергії є недостатніми для утворення надійних когезійних і адгезійних зв'язків навіть для шару мінімальної товщини. Залишкова пористість покриттів становить 3...5%. У матеріалі основи спостерігається зона структурно-фазових перетворень малої товщини – ЗТВ, яка є сумішшю з мартенситу і сорбіто-перліту, що переходить у початкову феритно-перлітну суміш. Розподіл мікротвердості тут характеризується меншим розкидом (HV0,05-300...500). Глибина перехідної зони становить близько 20...50 мкм.

Поверхня матеріалів, оброблених за високого рівня погонної енергії (200...400 кДж/м), відрізняється хвилястістю та відсутністю тріщин.

Мікроструктура оплавлених покриттів на даних режимах характеризується підвищеною дисперсністю і однорідністю, має високу щільність при середній пористості 1...3 % і глибоку ЗТВ, яка складається з двох характерних частин. Перша частина, глибиною до 100 мкм, являє собою мартенсит загартування та мартенситу відпустки. Друга, глибиною близько 400...600 мкм, є сорбітоперліт, що переходить у початкову структуру. На всьому проміжку межі розділу покриття-основа наявності пір, тріщин чи інших дефектів немає. Однорідний розподіл мікротвердості у покритті та його плавне зниження у перехідній зоні свідчать про досить повну гомогенізацію структури та фазового складу покриття, суттєву дифузію заліза основи у поверхневі шари покриття. Мікротвердість оплавленого шару коливається не більше (HV<sub>0,05</sub>–350...600).

При оплавленні лазерним випромінюванням покриттів із сплавів на основі нікелю, якісний рентгенофазовий аналіз встановив наявність двох основних структурних складових: ізольовані ніздрюваті, а іноді і розгалужені зерна  $\gamma$ -твердого розчину нікелю та евтектика  $\gamma$ -Ni+Ni(B,C). Завдяки наявності в напиленому сплаві хрому також були ідентифіковані зміцнювальні фази у вигляді його карбідів Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і боридів CrB, CrB<sub>2</sub>.

Усі структурні складові дрібнодисперсні. Твердий розчин пересичено легуючими компонентами. Аналіз показує, що процес утворення карбідів та боридів спрямовується через утворення сегрегацій хрому або утворення метастабільних проміжних фаз. Розподіл дрібнодисперсних твердих фаз, що утворилися, є рівномірним. Через війну мікротвердість оплавленого сплаву значно вирівнюється проти традиційними методами оплавлення.

У всіх випадках при лазерному оплавленні з високим рівнем погонної енергії на межі оплавленого матеріалу покриття з основним металом утворюється світлий пластинчастий шар. Як показують результати металографічного аналізу, він є перехідною зоною зі структурою безперервного ряду твердих розчинів, тобто, забезпечений металургійний зв'язок основи і оплавленого шару. Перехідний шар є сіткою, яка утворена

тонкими голками дендритів. Товщина перехідної зони збільшується при зниженні швидкості плакування.

Під перехідною зоною переважно металі спостерігається зона термічного впливу (ЗТВ). Твердість ЗТВ та її структура обумовлюються властивостями матеріалу основи та суттєво залежать від режиму лазерного переплаву покриття. Матеріал останнього може впливати на властивості ЗТВ лише за умови проникнення їх у основний метал при лазерному перепаві з високими погонними енергіями, що забезпечує значне проплавлення основи.

При досягненні критичного рівня погонної енергії (понад 400 кДж/м) спостерігається інтенсивне вигоряння як окремих ділянок покриття, і його самого.

**Висновки.** Експериментальна оцінка впливу параметрів лазерного модифікування на зміну структур попередньо нанесених газотермічними способами покриттів з самофлюсуючих сплавів на основі нікелю показала, що в порівнянні з плазмовим і газополум'яним оплавленням, забезпечується більш висока щільність покриттів, знижується дисперсність їх структури, а також усуваються такі недоліки як пороутворення, недостатня міцність зчеплення покриття з основою, нерівномірність по товщині, хімічна та структурна неоднорідність. Визначальним чинником при лазерному оплавленні покриттів із сплавів, що самофлюсуються, системи Ni-Cr-V-Si є величина погонної енергії. Встановлено, що в інтервалі 200...400 кДж/м забезпечується рівномірний розподіл зміцнювальних фаз у нікелевій матриці та утворення вузької (10...30 мкм) зони сплавлення з основним металом. Збільшення погонної енергії у зазначеному інтервалі підвищує однорідність та дрібнодисперсність структури оплавлених шарів, усуваються такі дефекти як тріщини та пори. Результати проведених досліджень можуть бути використані для отримання зносо- та корозійностійких покриттів на деталях зі сталей та мідних сплавів, що застосовуються у двигунобудуванні, машинобудівній, металургійній, поліграфічній, хімічній та інших галузях промисловості.

#### Список літератури:

1. Yulchieva S., Olimov A., Yunusov, Yu. Gas thermal and galvanic coatings on the surface of parts. *International Journal of Innovative Analyses and Emerging Technology*. 2022. Т. 2. №. 2. С. 26–30. URL: <http://openaccessjournals.eu/index.php/ijiaet/article/view/1016>
2. Poliarus O., Morgiel J., Umanskyi O., Pomorska M., Bobrowski P., Szczerba M., Kostenko O. Microstructure and wear of thermal sprayed composite NiAl-based coatings. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019. Т. 19. №. 4. С. 1095–1103. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.06.002>

3. Smirnov I., Lopata A., Smirnova T., Lopata L. Improvement of functional properties of gas-thermal coatings by electro-contact treatment. *Problems of Tribology*. 2020. Т. 25. №. 1/95. С. 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-41-48>
4. Спиридонов Н.В., Протасович В.А., Самодеева Т.И. Влияние лазерной обработки на структуру и триботехнические свойства плазменных покрытий из самофлюсующихся сплавов. *Порошковая металлургия*. 1988. № 1. С. 11–14.
5. Постников В.С., Часова Л.В. Формирование структуры в самофлюсующихся покрытиях на никелевой основе. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991. № 3. С. 5–8.
6. Шмаков А.М., Ившина Н.Н. Структура и свойства композитов при лазерном модифицировании плазменных покрытий на порошковых материалах. *ФХИОМ*. 1992, № 5. С. 90–99.
7. Алхимов, А. П., Косарев, В. Ф., Папырин, А. Н. Новые материалы и технологии. *Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах*. Новосибирск : Наука. 1992. 200с.

**Bernatskiy A.V., Siora O.V., Sokolovskiy M.V., Lukashenko V.A., Danyleiko O.O., Nabok T.M., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O. INFLUENCE OF THE LASER SURFACE ALLOYING PARAMETERS ON THE CHANGES IN THE STRUCTURE OF THE COATINGS MADE OUT OF SELF-FLUXING ALLOYS**

*The traditional technology of the self-fluxing alloy powder coatings calls for its spraying on the already prepared surface, followed by a finishing mechanical refinement. If necessary, thermal spraying is carried out by heating the sprayed powder to a temperature corresponding to the crystallization interval of a given alloy with subsequent slow cooling. However, due to the usage of heat sources with low energy concentration, a number of negative features appear, such as: volumetric heating of the work pieces to high temperatures; strengthening of tempering and recrystallization processes; softening of the base material as well as significant temperature deformations. All of this significantly narrows down the scope of usage of this technology, forcing us to look for new heating methods for coatings. One such method is the usage of powerful technological lasers. It has been experimentally established that during laser surface alloying of coatings, usually manufactured by thermal spraying, thanks to the extremely high rates of heating and cooling, a number of disadvantages, caused by the specifics of phase and structure formation of materials during thermal spraying, can be eliminated, namely: pore formation, low strength of the bond between the coating and the base material, significant roughness of the coating after subsequent filing, uneven thickness, chemical and structural heterogeneity, etc. Dependencies between the technological parameters of laser radiation and the dimensions of the melted layers during surface laser alloying of coatings, made out of PG-10N-01 and PG-12N-01 self-fluxing alloys on steel and copper bases, were established. They have some common features, related to the formation of structures, related to the energy inputs of the process. The decisive factor in the laser surface alloying of gas-thermal coatings made of self-fluxing alloys with laser radiation is the energy input: with its increase, the homogeneity and fine dispersion of the structure of the melted layers increases, while defects such as cracks and pores disappear. An increase in the heat input increases the uniformity as well as the structure fineness of the melted layers of the coating, while getting rid of such defects as cracks and pores. When carrying out laser surface alloying of coatings on the copper base, usage of the laser radiation as the heat source allows us to avoid additional technological operations, namely, the preliminary heating of samples as well as the application of the sublayer. Results of the conducted study can be used to obtain wear- and corrosion-resistant coatings on steel- and copper alloy-made parts, which are used in machinery, metallurgical, printing, chemical as well as other industries.*

**Key words:** coatings, self-fluxing alloys, laser surface alloying, structure, changes, properties, defects.

**Погребова І.С.**

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

**Янцевич К.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

## СТРУКТУРА ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ЗА УЧАСТЮ ХРОМУ ТА КРЕМНІЮ

*Поєднання важливих фізико-хімічних властивостей, таких як корозійна стійкість, жаростійкість, зносостійкість, можливо за рахунок нанесення захисних дифузійних покриттів за участю хрому та кремнію.*

*Дифузійні хромосиліцидні покриття наносили на сталь 45 газовим методом у спеціально розробленій в НТУУ «КПІ імені І. Сікорського» установці, яка мала спеціальну реакційну камеру нової конструкції. Процес проводили впродовж 6 годин у замкнутому реакційному середовищі при тиску активної газової фази ( $10^6$  Па) та температурі 1323К. В якості вихідних реагентів для нанесення дифузійних покриттів використовували порошки феросиліцію, хрому, а також чотирихлористий вуглець і графіт. У роботі вивчено фазовий склад дифузійних покриттів. Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі «Neophot 21». Рентгеноструктурний аналіз проводили на установці ДРОН-3-М в монохроматичному SiKa-випромінюванні. Дослідження зносостійкості зразків з хромосиліцидними покриттями при терті ковзанні без змащування по ваговим показникам виконували на машині тертя МТ-68М по схемі вал – вкладки при навантаженні  $P = 0,5$  МПа та швидкості ковзання  $V = 10$  м/с.*

*Рентгеноструктурним пошировим аналізом встановлено, що поверхні сталі 45 дифузійний шар складається з двох зон – зовнішній до  $(10-20) \cdot 10^{-6}$ м, яка містить карбіди хрому  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  (переважно  $Cr_7C_3$ ) та внутрішній  $(60-80) \cdot 10^{-6}$ м, що представляє собою твердий розчин кремнію та хрому у  $\alpha$ -залізі. Загальна товщина покриттів сягала 100 мкм. Мікротвердість – 19,5 ГПа.*

*За результатами проведення триботехнічних досліджень хромосиліцидних покриттів спостерігається зниження коефіцієнту тертя на 15% у порівнянні з однокомпонентним карбідним покриттям на основі хрому. Важливо відзначити, що нанесення дифузійних хромосиліцидних покриттів підвищують зносостійкість сталі 45 у 2,1–3 рази. Таким чином, отримані нами захисні покриття можна рекомендувати для відновлення зношених деталей, а також у виробництві деталей з високою зносостійкістю.*

**Ключові слова:** дифузійні покриття, хром, кремній, структура, фазовий склад, зносостійкість.

**Постановка проблеми.** Сучасне виробництво ставить високі вимоги до підвищення ресурсу та надійності роботи машин та механізмів. Проблема вирішення підвищення довговічності деталей машин і виробів в останні роки є дуже актуальною. Працездатність виробів, які знаходяться у контактній взаємодії в багатьох випадках визначається зносом. Вирішення проблеми підвищення якості інструменту, виходячи з необхідності поліпшення їх експлуатаційних властивостей, може здійснюватися, як за рахунок застосування вже існуючих методів зміцнення, так і за рахунок їхнього удосконалення та створення нових [1; 2; 9; 15].

Відомо багато способів нанесення зміцнюючих покриттів, а саме електродугові покриття [3], газотермічне напилювання [4] тощо. Найпошире-

ним способом нанесення зміцнюючих покриттів, є хімічне хіміко-термічна обробка (ХТО) металів (азотування, карбонітрація, оксидування, борирування) [5; 6]. Останнім часом поверхневе насичення металів та сплавів одночасно двома (хромом і титаном, хромом і кремнієм, молібденом і кремнієм, титаном і ванадієм тощо) і більш елементами має переваги в порівнянні з насиченням одним елементом. Можна припустити, що отримані таким чином дифузійні покриття будуть поєднувати і в багатьох випадках підсилувати позитивні властивості покриттів після однокомпонентного насичення [7; 8]. В зв'язку з цим, має інтерес визначення взаємозв'язків між типом покриття, його структурою, мікротвердістю, зносостійкістю. Отримані результати дозволять коректно підійти до вибору раціонального типу



покриття для конкретних умов експлуатації у промисловості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед процесів ХТО особливе місце посідає дифузійне хромування металів і сплавів із додаванням інших легуючих елементів (титаном, бором, кремнієм, алюмінієм), що дозволяє змінити структуру і фазовий склад хромованих шарів і, як наслідок, досягти більш високої твердості й зносостійкості поверхні, порівняно з іншими видами поверхневої обробки. Отримані таким чином багатокомпонентні дифузійні покриття володіють цілим комплексом фізико-хімічних і механічних властивостей, що обумовлюють високу зносостійкість, жаростійкість і корозійну стійкість виробів, підданих хіміко-термічній обробці [7–10].

Для підвищення зносостійкості, жаростійкості й корозійної стійкості металів та сплавів застосовують легування хрому, ніобію, молібдену домішками кремнію. У результаті дифузійного насичення змінюється структура поверхневих шарів на сталі та формується, підшарок, збагачений легуючими елементами, який має високий комплекс експлуатаційних властивостей [11–14]. Силіцидні покриття за участю молібдену володіють високою мікротвердістю – 15,0–17,0 ГПа, але вони крихкі і не знайшли широкого застосування [11]. Захисні покриття за участю алюмінію та кремнію підвищують корозійну та жаростійкість, але не володіють високою мікротвердістю та зносостійкістю [12]. Поєднати важливі фізико-хімічні властивості такі як корозійна стійкість, жаростійкість, зносостійкість можливо за рахунок нанесення захисних дифузійних покриттів за участю хрому та кремнію [7; 8; 9; 13; 14]. Хромосиліціювання – відомий спосіб хіміко-термічної обробки, який незважаючи на перспективність його використання не набув до цього часу широкого застосування в промисловості. Це пов'язано з недостатністю простих способів нанесення дифузійних покриттів, відсутністю цілеспрямованих досліджень їх складу, структури та захисних властивостей.

**Постановка задачі.** Метою роботи було дослідження зносостійкості дифузійних покриттів за участю хрому та кремнію, нанесених на сталь 45.

**Виклад основного матеріалу.** Дифузійні хромосиліцидні покриття наносили на сталь 45 газовим методом у спеціально розробленій в НТУУ «КПІ імені І. Сікорського» установці, яка мала спеціальну реакційну камеру нової конструкції [16]. В конструкції робочої камери при нанесенні хромосиліцидного покриття вперше було застосовано реакційний стакан з графітовим дном, що дало можливість підвищити активність газо-

вої фази та пришвидшити процес формування дифузійних шарів. Процес проводили впродовж 6 годин у замкнутому реакційному середовищі при тиску активної газової фази ( $10^6$  Па) та температурі 1323К. В якості вихідних реагентів для нанесення покриттів використовували порошки хрому, кремнію та чотирихлористий вуглець.

Металографічні дослідження здійснювали на оптичному мікроскопі «Neophot 21». Рентгеноструктурний аналіз проводили на установці ДРОН-3М у монохроматичному  $\text{CuK}\alpha$  випромінюванні.

Дослідження зносостійкості зразків з покриттями при терті ковзанні без змащування по ваговим показникам виконували на машині тертя МТ-68М по схемі вал – вкладка при навантаженні  $P = 0,5$  МПа та швидкості ковзання  $V = 10$  м/с. Матеріал контртіла – сталь 65Г, загартована та відпущена, твердість HRC 55, матеріал зразка сталь 45. Підготовка зразків до випробування на зносостійкість включала зачищення, промивку у дистильованій воді та знежирювали етиловим спиртом. Величину зносу оцінювали гравіметричним методом, шляхом зважування зразка до і після випробування. Оцінку зміни маси зразка проводили на аналітичних терезах ВАЛ – 200Г з точністю до п'ятого знаку через рівні інтервали часу (10, 30, 60 хвилин). Визначення коефіцієнту тертя по зазначеній методиці виконували аналогічно, як при випробуваннях на зносостійкість виробів із покриттями при терті ковзанні без змащування по приведеному зносу [2; 17]. За величиною показника втрати маси (I, кг) будували графіки залежності від тривалості зношування ( $\tau$ , хвилин).

Встановлено, що комплексні покриття за участю хрому та кремнію, нанесені на поверхню сталі 45, згідно з даними мікроструктурного аналізу, складаються з двох зон, які розташовані паралельно до поверхні насичення. Загальна товщина покриттів становить 100 мкм. Рентгеноструктурним пошаровим аналізом встановлено, що поверхні сталі 45 дифузійний шар складається з двох зон – зовнішній до  $(10-20) \cdot 10^{-6}$  м, яка містить карбіди хрому  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (переважно  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) та внутрішній  $(60-80) \cdot 10^{-6}$  м, що представляє собою твердий розчин кремнію та хрому у  $\alpha$ -залізі. Мікротвердість складала 19,5 ГПа [18].

Металографічно карбідні покриття  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  виявляються в виді світлої смуги, розташованої паралельно фронту дифузії, яка не травиться 3%-вим розчином азотної кислоти в етиловому спирті, та мають чітку границю поділу з зоною, що відповідає твердому розчину хрому та кремнію у  $\alpha$ -залізі (рисунок 1).

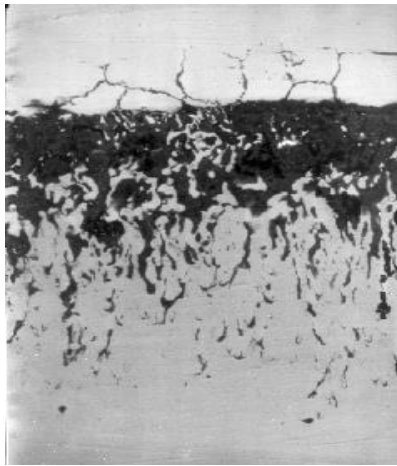
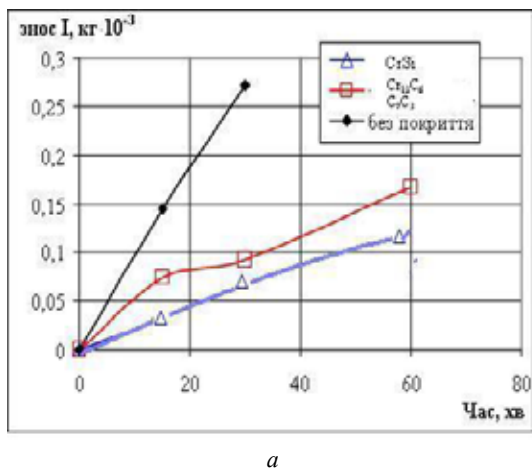
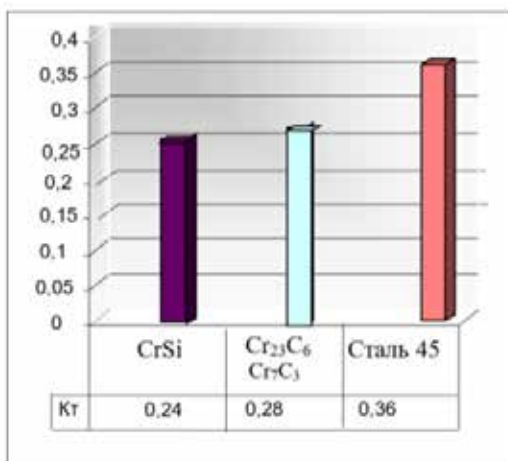


Рис. 1. Мікроструктура хромосиліційованої сталі 45;  $\times 200$

Кінетичні криві зношування хромосиліцидних покриттів в умовах тертя ковзання без змащування представлено на рис. 2а.



а



б

Рис. 2. Криві залежності втрати маси від часу іспитів (а) та гістограма значень коефіцієнту тертя для дифузійних покриттів на основі карбідів хрому, хрому і кремнію на сталі 45 та сталі 45

Показано, що незважаючи на руйнування хромосиліцидного покриття в зоні тертя, спостерігається значне зниження показника зносу (I) та коефіцієнту тертя ( $K_t$ ) в порівнянні з карбідними покриттями на основі хрому [2; 19] (рис. 2).

Триботехнічні дослідження в умовах тертя ковзання показали, що хромосиліцидні покриття товщиною 100 мкм руйнуються в перші 20–40 секунд роботи. При цьому зносостійкість композиції покриття – основа підвищується в 20 разів в порівнянні зі сталлю без покриття.

Аналіз результатів отриманих даних показав, що швидкість зносу покриттів на основі карбідів хрому дещо вища за хромосиліцидні покриття. Це пов'язано мабуть з тим, що дифузійні покриття на основі карбідів хрому, товщиною 10–20 мкм, руйнуються вже на початковій стадії, і інтенсивність зношування при цьому досягає максимуму. Водночас, як показав рентгеноструктурний аналіз, хромосиліцидні покриття складаються з двох зон – внутрішньої та зовнішньої. Можемо припустити, що внаслідок зношування хромосиліцидних покриттів на початковій стадії відбувається руйнування карбідного шару (зовнішня зона), але потім швидкість зносу гальмується та стає стабільною у широкому інтервалі часу за рахунок утворення твердого розчину кремнію та хрому у  $\alpha$ -залізі (внутрішня зона). Також, є припущення, що знос відбувається лише до певного «критичного» розміру зерна і потім знос деталей залишається постійним або зовсім гальмується [15].

Металографічними дослідженнями було показано, що в зоні тертя (рис. 3) на дні лунки зносу в досліджуваних хромосиліцидних покриттях, глибина якої приблизно сягає 10–15 мкм, відзначена наявність часток карбідних фаз, що ймовірно захоплюються контртілом і впроваджуються в найбільш пластичні ділянки поверхні лунки. Мікроструктура поверхні тертя хромосиліцидного покриття, нанесеного на сталь 45, наведено на рисунку 3.

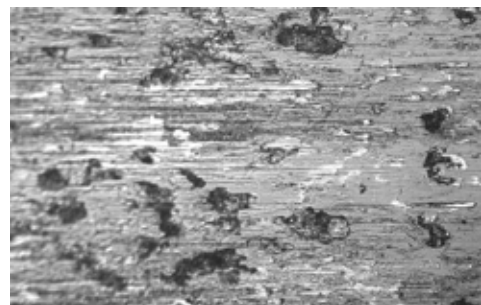


Рис. 3. Мікроструктура лунок зносу зразка з хромосиліцидним покриттям на сталі 45 після тертя ковзання без змащування з вимірюванням втрати маси,  $\times 200$

За результатами проведених триботехнічних досліджень хромосиліцидних покриттів було відмічено зниження коефіцієнту тертя на 15% в порівнянні з однокомпонентним карбідним покриттям на основі хрому. Отримані в роботі хромосиліцидні покриття за запропонованим способом мають більш високу зносостійкість порівняно з карбідними покриттями на основі хрому. Таким чином, хромосиліцидні покриття можна рекомендувати для відновлення зношених деталей, а також при виробництві деталей з підвищеною зносостійкістю.

Автори висловлюють глибоку вдячність професору, д.т.н. [Хижняку В.Г.] за допомогу в виконанні дослідження на зносостійкість.

### Висновки

Дифузійні покриття, отримані при комплексному насиченням сталі 45 хромом і кремнієм газовим методом склалися з двох зон – зовнішньої, яка містить карбіди хрому  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  та внутрішньої, що представляє собою твердий розчин кремнію та хрому  $\alpha$ -залізі. Загальна товщина покриття – 100 мкм. Мікротвердість складала 19,5 ГПа. За результатами проведених триботехнічних досліджень хромосиліцидних покриттів було відмічено зниження втрати маси та коефіцієнту тертя на 15% в порівнянні з однокомпонентним карбідним покриттям на основі хрому.

### Список літератури:

1. Дубинин Г. Н. Диффузионное хромирование сплавов. Москва : Машиностроение, 1984. 452 с.
2. Лоскутов В. Ф., Хижняк В. Г., Погребова І. С., Горбатюк Р. М., Бочар І. Й. Карбідні покриття на сталях і твердих сплавах. Тернопіль : Лілея, 1998. 144 с.
3. Похмурський В. І., Студент М. М., Довгунік В. М. Електродугові відновні та захисні покриття. Львів, 2005. 190 с.
4. Борисов Ю. С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. К. : Наукова думка, 1987. 544 с.
5. Ворошнин Л. Г. Борирование промышленных сталей и сплавов. Минск, 1981. 205 с.
6. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М., 1976. 256 с.
7. Земсков Г. В., Коган Р. Л. Многокомпонентные диффузионное насыщение металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1978. 208 с.
8. Ворошнин Л. Г., Пантелеенко Ф. И., Константинов В. М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. Минск, 2001. 148 с.
9. Похмурский В. И., Далисов В. Б., Голубец В. М. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. К. : Наукова думка, 1980. 188 с.
10. Лоскутова Т. В., Сігова В. І., Хижняк В. Г., Лоскутов В. Ф. Комплексні карбідні покриття на металах і сплавах. Вид-во СумДУ, 2009. 190 с.
11. He Naoran, Xu Junqiang, Miao Xin, Liu Qi, Bo Xinwei. Preparation, Modification and Oxidation Resistance of Silicide Coatings on Mo and Mo Alloys Substrates : a Review. *Materials Reports*. 2019. V. 33 № 19. P. 3227–3235.
12. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Сорокин В.Г., Пугачева Н.Б., Бабич Н.В. Коррозионная стойкость легированных алюмосилицидных покрытий. *Энергомашиностроение*. 1984. № 1. С. 24 – 26.
13. Gaillard-Allemand B., Vilasi M., Belmonte T., Steinmetz J. Silicide Coatings for Niobium: Mechanisms of Chromium and Silicon Codeposition by Pack Cementation. *Materials Science Forum*. 2001. P. 727–734.
14. Bauer I., Baryga A. Tribolocorrosion of a chromosiliconized layer. *Technical. Sciences* . 2013. № 16(2). P. 85–92.
15. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М. : Наука, 1970.
16. Лоскутов В.Ф., Погребова І.С., Лоскутова Т.В., Янцевич К.В., Нестеренко Ю.В. Спосіб нанесення карбідних покриттів. Патент України на винахід 50193 А ; власник НТУУ «КПІ» ; опубл. 15.10.2002. Бюл. № 10.
17. Мамыкин Э.Т., Ковпак М.К., Юга А.И. Комплекс машин и методика определения антифрикционных свойств материалов при трении скольжения. *Порошковая металлургия*. 1973. № 1. С. 67–72.
18. Погребова І.С., Янцевич К.В., Хижняк В.Г., Лоскутова Т.В. Фізико-хімічні умови комплексного насичення вуглецевої сталі 45 кремнієм та хромом в середовищі хлору. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2014. № 6. С. 152–155.
19. Хижняк В.Г., Король В.І. Механічні властивості карбідних покриттів за участю титану та хрому на сталі У8А. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2003. Т. 4. № 1. С. 401–403.

**Pogrebova I.S., Iantsevitch C.V. STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF DIFFUSION COATINGS WITH CHROME AND SILICON**

*It is possible to combine important physicochemical properties such as corrosion resistance, heat resistance, wear resistance due to the application of protective diffusion coatings with the participation of chromium and silicon.*

*The work present diffusion chromosilicide coatings were applied to steel 45 by the gas method in a specially developed installation at NTUU “KPI name I. Sikorsky”, which had a special reaction chamber of a new design.*

*The chromosilicide coatings were applied to steel 45 by the gas method. The process was carried out for 6 hours in a closed reaction medium at the pressure of the active gas phase ( $10^6$  Pa) and a temperature of 1323K. Ferrosilicon, chromium powders, as well as carbon tetrachloride and graphite were used as starting reagents for applying diffusion coatings. In the work was studied phase compositions of diffusion coatings. Metallographic studies were performed on an optical microscope “Neophot 21”. X-ray diffraction analysis was performed on a DRON-3-M unit in monochromatic  $\text{CuK}\alpha$  radiation. Studies of wear resistance of samples with coatings during sliding friction without lubrication by weight were performed on a friction machine MT-68M. The wear resistance of chromosilicide coatings applied to carbon steel 45 was investigated.*

*The X-ray diffraction layer analysis revealed that the diffusion layer on the surface of steel 45 consists of two zones – the outer (10–15)  $10^{-6}$  m, which contains chromium carbides  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  and  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  and inner (60–80)  $10^{-6}$  m, which consists of a solid solution of silicon and chromium  $\alpha$ -Fe. The total thickness of the coatings is 100  $\mu\text{m}$ . Microhardness – 19.5 GPa. According to the results of conducting tribotechnical studies of chromosilicide coatings, a decrease in the coefficient of friction by 15% was observed in comparison with the one-component chromium-based carbide coating. Crucially, we determine that diffusive chromosilicide coatings increase the wear resistance of Steel 45 by 2,1–3 times. Thus, chromosilicide coatings can be recommended for the restoration of worn parts, as well as in the production of parts with high wear resistance.*

**Key words:** *diffusion coatings, chrome, silicon, structure, phase composition, wear resistance.*

# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.331

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/03>**Топчій Н.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## ПОРТАТИВНІ ТВЕРДОМІРИ: ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ

У даній статті проведено дослідження електронних портативних твердомірів, розкрито поняття твердості, методів вимірювання твердості, історію виникнення та основні принципи роботи портативних твердомірів.

Останнім часом технологічний розвиток в галузі металообробки, енергетики та машинобудування призводить до все більш широкого застосування зміцнювальних та функціональних покриттів, тонких плівок, різних технологій модифікації поверхні. Одними з найважливіших характеристик матеріалів є їх механічні властивості, що визначають споживчі та експлуатаційні характеристики матеріалів та є непрямими показниками їхньої якості. Узагальненою характеристикою механічних властивостей матеріалів є жорсткість. Вимірювання твердості широко поширені в промисловості при проведенні контролю технологічних процесів, визначенні експлуатаційних характеристик виробів, виборі режимів механічної обробки та типу ріжучого інструменту тощо.

Як правило, сучасний переносний твердомір дозволяє вимірювати твердість за всіма основними існуючими шкалами. Портативним твердоміром вимір проводиться безпосередньо на деталі, що є явною перевагою таких приладів. Переносний твердомір – це електронний пристрій і тому в ньому зазвичай є цілий набір корисних функцій, таких як можливість збереження вимірів, формування та редагування протоколів результату контролю, передача вимірів на електронно-вимірювальний пристрій для подальшої обробки, друк результатів вимірювання на принтер прямо з твердоміра. Портативні твердоміри дозволяють виміряти твердість з точністю, що не поступається стаціонарним та при цьому мають низку незаперечних переваг. Портативні прилади, порівняно зі статичними твердомірами Брінелля, Роквелла і Віккерса, мають безперечні переваги, що полягають у можливості контролю об'єктів, що знаходяться в експлуатації без виготовлення спеціальних зразків і руйнування виробу. Також вони дозволяють контролювати великі об'єкти з довільно орієнтованими у просторі поверхнями

**Ключові слова:** твердість, твердомір, вимірювання, об'єкт вимірювання, метод, принцип.

**Постановка проблеми.** Завдання вимірювання твердості було актуальним завжди, проте в даний час його значимість особливо зросла, що зумовлено необхідністю при проведенні технічного діагностування, експертизи промислової безпеки.

Портативні електронні твердоміри знайшли широке вживання для контролю твердості деталей, як в процесі виробництва, так і в процесі експлуатації. У багатьох галузях промисловості широкого поширення набули твердоміри динамічної дії, робота яких заснована на ударному методі докладання навантаження та визначення твердості за параметрами впровадження індентора у матеріал.

Велика різноманітність цих приладів зводиться всього лише до чотирьох принципів виміру твердості – по відскоку, по різниці частот між власною частотою коливань діамантового індентора і частотою заздалегідь навантаженого діамантового індентора, визначення твердості по величині електричного опору спеціального діамантового індентора та який реалізовує метод візуалізації відбитку індентора. Н оптичні системи вимірювання відстані між об'єктами. Вони можуть бути різні і включають в себе питання розпізнавання об'єктів, визначення фізичних параметрів середовища. Однією з найважливіших є визначення відстані до об'єктів. Наявність оптичної системи

в складі сучасного виробничого пристрою дозволяє оцінювати стан навколишнього простору. Це особливо важливо для рухомих технічних пристроїв, оскільки забезпечує безпеку і дозволяє приймати рішення про найбільш вигідніший спосіб виробництва [1, с. 118].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових надбань за темою дослідження показав масштабність сучасних досягнень.

Дослідженням проблемних питань аналізування вимірювань твердості займалися такі вітчизняні науковці, як Ляпунов А. М., Мітрофан Н.В., Алексін В.П. та інші.

Серед закордонних досліджень заслуговують на увагу праці І. Снеддона, Н.А. Стіллвела, Г.М. Фарра.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам вимірювання твердості, стрімке оволодіння сучасними технічними методами вимірювання зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

**Мета.** Провести аналіз принципів реалізації існуючих методів вимірювання твердості.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Перш ніж перейти до розгляду основного матеріалу дослідження, слід уточнити визначення поняття твердості:

**твердість** – здатність матеріалу чинити опір деформуванню та руйнуванню під дією місцевих контактних зусиль [2].

Твердість – одна з важливих характеристик, що вказує на здатність матеріалу чинити опір поверхневій деформації під дією більш твердого тіла. Знаючи твердість того чи іншого металу, можна судити про його опірність тертю, зносостійкість, оброблюваність, стійкість поверхневих шарів до руйнування тощо. Все це дозволяє розраховувати залишковий ресурс об'єкта контролю. Для інструментального визначення твердості методом втиснення використовуються твердоміри.

Для вимірювання твердості металів є кілька шкал (методів вимірювання):

Метод Брінелля – твердість визначається за діаметром відбитка, який залишає металева кулька, що втискується у поверхню. Твердість обчислюється як відношення зусилля, прикладеного до кульки, до площі відбитка (причому площа відбитка береться як площа частини сфери, а не як площа кола). Твердість, визначена за цим методом, позначається HB, де H = hardness (твердість, англ.), B – найменування шкали. Вимірювання проводяться відповідно до стандарту ДСТУ ISO 6506-1:2007 [3].

Метод Роквелла – твердість визначається за глибиною відбитка металевої кульки чи алмазного конуса у поверхні тестованого матеріалу. Твердість, визначена за цим методом, є безрозмірною і позначається HR, HRB, HRC і HRA; твердість обчислюється за такою формулою  $HR = 100 - kd$ , де  $d$  – глибина втиснення накопичника після зняття основного навантаження, а  $k$  – коефіцієнт. Отже, нескінченній твердості відповідає HR 100; м'які матеріали можуть мати негативні значення твердості [3].

Метод Віккерса – твердість визначається за величиною відбитка, залишеного чотирикутною алмазною пірамідкою, яка втискується у поверхню. Твердість обчислюється як відношення зусилля, докладеного до пірамідки, до площі відбитка (причому площа відбитка береться як площа частини поверхні піраміди, а не як площа квадрата); одиницею твердості служить кгс/мм<sup>2</sup>. Твердість, визначена за цим методом, позначається HV [3].

Портативні твердоміри хоч і можуть визначати твердість у тих же шкалах, що й стаціонарні прилади – Брінелля, Роквелла, Віккерса та інших – однак відрізняються від них докорінно, оскільки реалізують зовсім інші методи вимірів. Результати в HB, HRC, HL, HV та інших шкалах виходять шляхом перерахунку за алгоритмом математичної обробки. У кожного виробника портативних твердомірів він свій. Якогось єдиного стандарту тут немає – за винятком хіба що довідкових, що допускають інші співвідношення різних шкал у технічно обґрунтованих випадках.

Портативні прилади легші, їх можна застосовувати для оперативного контролю якості продукції на заводі, для вивчення властивостей матеріалів лабораторій. Твердість металу заміряється у вигляді механічного на підконтрольний зразок.

Динамічні прилади мають ряд переваг:

- можна оцінити твердість виробів з неоднорідною або крупнозернистою структурою, наприклад, литих або кованих;
- вимірювання твердості чорних металів;
- контроль якості кольорових металів;
- можна проконтролювати та міцність сталі на розрив [4].

Існує кілька моделей твердомірів. До того, як купити прилад, важливо визначитися зі структурою та властивостями вимірюваних матеріалів. Важливо також зважати на габарити контрольних зразків для перевірки. Для визначення параметра щільності користуються шкалами Роквелла, Віккерса, Брінелль та Шора. Якщо виріб виконаний з м'якого матеріалу, краще виміряти його

міцність за шкалою Брінеля або Шора. Твердоміри зі шкалою Роквелла найкраще підійдуть для вимірювання твердих матеріалів. Але найміцніші виробу прийнято виміряти шкалою Віккерса.

Твердість найчастіше визначають, як властивість поверхневого шару матеріалу чинити опір впровадженню іншого, твердішого тіла (індентора), за його зосередженому вплив на поверхню матеріалу [5]. Найбільш поширеними формами інденторів є: сталеві кульки, алмазна піраміда або конус. При контакті індентора з поверхнею виникають механічні напруги, що визначаються його формою, зусиллям, що прикладається, та методом вдавлювання. Залежно від величини цих напруг у поверхневому шарі металу відбуваються пружні, пружно-пластичні або пластичні деформації, що визначають значення твердості [6].

Найчастіше у таких приладах реалізуються наступні методи.

Ультразвуковий контактний імпеданс (UCI). В об'єкт впроваджується металевий стрижень з алмазним конусоподібним наконечником, внаслідок чого змінюється резонансна частота останнього. Розмір цього згасання корелює з твердістю об'єкта. Вважається, що UCI-метод є більш вимогливим до шорсткості поверхні. Для правильного калібрування потрібно вірно вказувати модуль пружності матеріалу. При цьому вимоги до вертикальної орієнтації датчика в момент виміру – не такі жорсткі, як при ударному методі, хоча насправді датчик у будь-якому випадку треба намагатися тримати перпендикулярно до поверхні. Допустимим відхиленням для UCI-методу вважається 15 градусів. З іншого боку, ультразвуковий контактний імпеданс гарний тим, що залишає на досліджуваній поверхні менший відбиток і підходить для контролю виробів малої товщини.

Динамічний (ударний, Leeb). Заснований на вимірі відношення швидкості падіння бойка до швидкості відскоку. Порівняно з UCI даний метод має більшу стабільність і відтворюваність показників. Проте він працює переважно на товстостінних об'єктах, з достатньо великими вагогабаритними характеристиками. У момент спуску бойка датчик повинен розташовуватися вертикально щодо поверхні ОК (за наявності автоматичної компенсації кута нахилу). Відбиток при цьому залишається більшої площини, ніж після ультразвукового перетворювача. Індентор є кулькою з карбиду вольфраму (або кубічного нітриду Бору, кераміки, полікристалічного алмазу, загартованої сталі або іншого матеріалу) діаметром 1,5–5 мм.

Статичний метод (Супер-Роквелла, Portable Rockwell, PR). За принципом дії найближче до методу Роквелла, який реалізується у класичних стаціонарних твердомірах. Індентор датчика для статичного методу являє собою алмазний усічений конус. Відмінність полягає лише в тому, що портативні твердоміри мають справу з меншими навантаженнями. Метод ґрунтується на вимірі глибини впровадження індентора при попередньому та основному навантаженні. Відношення між цими двома величинами перераховується у значення твердості. Тобто це прямий метод, що практично не залежить від модуля пружності та вимог до маси та розмірів об'єкта. Результати визначаються безпосередньо у SPR, без перерахунку. Схема контролю повинна включати наступні операції. Перша – вимір твердості статичним способом безпосередньо на об'єкті контролю чи зразку з тієї ж матеріалу і з тими самими параметрами поверхні (шорсткість, чистота тощо.). Наступний крок – калібрування ультразвукових чи динамічних датчиків за отриманими показаннями, за необхідності – з введенням поправки на вплив модуля пружності матеріалу. Після цього можна переходити до контролю у звичних шкалах HB, HRC, HV, HL. Такий підхід дозволяє досягти найбільш точних і достовірних результатів і знизити вплив факторів, що заважають.

Датчики динамічного методу можна умовно розділити за кількома ознаками.

Енергія удару. Визначається двома ключовими факторами – масою бойка та швидкістю, з якою він падає. Чим більша енергія удару, тим більший діаметр і глибина відбитка. Їхні точні значення визначаються конкретною модифікацією датчика і твердості ОК і, зазвичай, обчислюються сотими або навіть тисячними частками міліметра. Стаціонарні твердоміри залишають відбитки на порядок більших розмірів. Наприклад, за методом Брінелля, діаметр відбитка може сягати 6,0 мм. В той же час існують спеціалізовані перетворювачі для контролю виробів малої товщини, чутливі до ударних впливів, у тому числі з гальванічним покриттям та поверхневим зміцненням. Для контролю виробів високої твердості (понад 450 HB) НВП існує датчик типу E. Повертаючись до енергії удару варто зазначити, що для більшості типових завдань із вимірювання твердості цілком достатньо 11,5 мДж. У датчика G, який рекомендований для об'єктів товщиною від 70 мм і шорсткістю Ra = 7,0 мкм, енергія досягає 90 мДж.

Радіус індентора. Найчастіше він становить 1,5 мм, але трапляються моделі з індентором 2.5, 3 і навіть 5 мм.

Допустима товщина об'єкта у виняткових випадках маса об'єкта може становити лише 0,5 кг. При роботі з датчиком G (шорсткість 3,2-7 мкм) без масивної основи мінімальна маса ОК повинна становити 15 кг. У більшості типових завдань застосовуються датчики, розраховані на мінімальну масу виробів 3, 5 або 6 кг.

Допустима маса об'єкта. Для одних датчиків допустимим вважається лише 1,5 кг, але найчастіше це 3–5 кг. У деяких випадках мінімальна маса дорівнює 15 кг.

З автоматичним (телескопічним) або ручним взводом бойка. У іншому випадку для підготовки до вимірювання деяких датчиків може бути потрібний спеціальний шомпол.

Для звичайних та важкодоступних ділянок. Наприклад, для вінців зубчастих коліс, у вузьких пазах, глухих отворах тощо. Для вимірювання на таких ділянках можна у звичайного датчика відкрутити опорну шайбу (захисну насадку).

З датчиком кута повороту та без нього. Наявність такого датчика дозволяє автоматично враховувати відхилення перетворювача від вертикального положення.

З впаяним кабелем або роз'ємом для самостійної заміни кабелю.

Ультразвукові перетворювачі для портативних твердомірів, як правило, виготовляються з трьома варіантами навантаження: 1, 5 або 10 кг (10, 50 або 100 Н – ньютонів). Чим воно більше, тим глибше індентор проникає в досліджуваний матеріал. В цілому, глибина відбитка все одно виходить менше, ніж при ударному методі. Це дозволяє контролювати вироби з гальванічним покриттям завтовшки всього 9 мкм. Допустима маса об'єкта в деяких випадках може становити лише 0,3–1,0 кг. З іншого боку – вимоги до шорсткості жорсткіші. У багатьох датчиків допустима шорсткість вибирається у  $R_a = 1,6$  мкм і навіть  $R_a = 0,8$  мкм.

Для вимірювань у важкодоступних зонах передбачені датчики з довгим та вузьким стрижнем. Зважаючи на те, що ультразвукові датчики реалізують інший метод вимірювання, то на відміну від датчиків для методу Ліба, вони можуть бути виготовлені в компактному виконанні.

Кожен тип датчиків розрахований на свою шорсткість:  $R_a = 0,4$  мкм,  $R_a = 1,6$  мкм,  $R_a = 2,0$  мкм,  $R_a = 7,0$  мкм,  $R_a = 12,5$  мкм і т.д. Шорсткість перевіряється за атестованими зразками шорсткості або за допомогою профілактометрів. Також потрібно переконатися, що на поверхні немає

покриттів (гальванічні покриття – це окремий випадок і для них є спеціальні датчики), накипу, іржі, мастильних матеріалів, забруднень та ін.

Контроль починається з вибору марки металу в налаштуваннях приладу та з вибору шкали вимірювань. Сучасні прилади дозволяють задавати в налаштуваннях параметри об'єкта, враховувати геометрію та ін. Проводити контроль рекомендується на чистій поверхні щонайменше 5 мм від краю об'єкта (10 мм для датчиків типу G) та 1 мм від найближчого відбитка після попереднього виміру.

Далі, тримаючи датчик у повітрі, необхідно звести пружинний механізм. Після встановлення датчика потрібно переконатися, що він розташований строго перпендикулярно до поверхні ОК і щільно притиснутий до неї. Після натискання кнопки спуску бойок, на кінці якого розташований кульковий наконечник з карбіду вольфраму або іншого твердого сплаву, падає в напрямній трубі на поверхню. Постійний магніт, що знаходиться всередині бойка, наводить в котушці індуктивності електрорушійну силу, яка конвертується у значення твердості відповідно до обраної шкали. Результат відображається на екрані електронного блоку. Якщо напрям удару бойка не збігався з напрямом сили тяжіння, то залежно від фактичного кута нахилу, типу датчика та діапазону значень.

Щоб отримати більш точні результати, у кожній точці може бути потрібна серія з 3–5 вимірювань з обчисленням середнього значення.

Конкретний спосіб визначення твердості вибирається виходячи з властивостей матеріалу, завдань вимірювання, умов його проведення, наявної апаратури тощо. Опис переваг та недоліків кожного з перерахованих методів вимірювання твердості наведено в описі твердомірів відповідного типу. Представлення отриманих розмірів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами відбувається безпосередньо від камер на екран монітору.

Введення графічної інформації виконується за наступним алгоритмом: пошук зображення на камері, виділення елементів зображення, що підлягають кодуванню, перетворення координат точок кодованого зображення в цифрову форму і передачу цифрового опису елементів зображення на комп'ютер для подальшої обробки.

**Висновки.** У роботі досліджено принципи реалізації вимірювання твердості. Наведено алгоритми роботи з детальним описом послідовності дій. Виявлено, що існуючі методи вимірювання



твердості не відображають цілком якогось одних певних властивостей матеріалів, тому немає прямого взаємозв'язку між різними шкалами і методами. Проте перспективи подальших досліджень ґрунтуються на вдосконаленні алгоритму використання кожного методу.

#### Список літератури:

1. Ляпунов А. М. Принципы работы портативных электронных твердомеров//Машинобудування. Харків, 2016, № 17 С. 118-123.
2. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробовування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
3. Вікіпедія. Твердість URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C> (дата звернення: 27.06.2022).
4. ТОВ НВФ "Стандарт-М" URL: <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/tverdomery> (дата звернення: 27.06.2022).
5. Козловский А.Э. Расчёт элементов конструкций на растяжение и сжатие: учеб.-метод. пособие / А.Э.Козловский; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. -Иваново, 2015. – 80 с.
6. Кондратьев А. В Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. / Совершенствование метода инструментального индентирования и программно-аппаратных средств контроля твердости металлических покрытий в микро- и нанометровых диапазонах – 2017 URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metoda-instrumentalnogo-indentirovaniya-i-programmno-apparatnykh-sredstv-/read> (дата звернення: 27.06.2022).

#### **Topchii N.V. PORTABLE HARDNEZERS: PRINCIPLES OF OPERATION AND ANALYSIS OF THE CURRENT STATUS OF METHODS AND INSTRUMENTS FOR MEASURING HARDNESS**

*In these statistical data, a study of electronic portable solid state drives was carried out, the disclosure of the concepts of hardness, hardness measurement methods, the history of occurrence and the basic principles of operation of portable solid state drives.*

*For the rest of the hour, technological development in the fields of metalworking, energy and mechanical engineering will lead to an ever wider stagnation of cost-effective coatings, thin slicks, and various upper modification technologies. One of the most important characteristics of materials are their mechanical characteristics, which are assigned to the use and use of the characteristics of materials and indirect indications of their cost. An important characteristic of the mechanical capacities of materials is hardness. The introduction of hardness in a wide increase in the workmanship during the control of technological processes, the selected operational characteristics of the mills, the choice of modes of mechanical processing of the adjustments of the cutting tool thinly.*

*As a rule, the daily transfer of a solid body is allowed to reveal hardness beyond all major skill scales. With a portable hardness tester, measurement is used directly on parts, which is clearly the main advantage of such devices. A portable solid state drive is an electronic device, as well as other functions, such as the possible refusal to save the results, the formation and coordination of control results protocols, the transmission of pulses to an electronic analyzer for sending, and the receipt of results on a solid state printer. Portable hardness testers make it possible to measure hardness with accuracy, which is not inferior to stationary ones and at the same time, they can achieve low non-peripheral transgressions. Portable accessories, paired with Brinell, Rockwell and Vickers static hardness testers, can be used without any troubles, which allow for the possibility of supervision of objects, which can be used in operation without preparing special equipment and destroying the mold. If you allow control of great objects with their upper*

**Key words:** *hardness, hardness tester, measurement, object of measurement, method, principle.*

**Шорнікова С.В.**

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

**Кузьменко Т.М.**

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

## ВИБІР МАТЕРІАЛУ КЛИНКА ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ХОЛОДНОЇ ЗБРОЇ

*Одним із найважливіших факторів, притаманних для холодної зброї є матеріал, з якого виготовляють ножі. Стаття присвячена саме вибору матеріалу клинка для виготовлення бойової, армійської, рибальської або мисливської зброї. Будь-яка людина з юних років знає, що ножі виготовляють із заліза, а точніше, із сплаву заліза з вуглецем, тобто сталі. Чим більше процентне відношення вуглецю в сплаві, тим більш пружна і тверда (після термообробки) наша сталь. Зрозуміло, що для виготовлення клинків годиться тільки високовуглецева сталь, яка в результаті термообробки набуває пружності та твердості. В ідеальному варіанті кількість домішок в сплаві повинна дорівнювати нулю – така сталь буде мати максимально можливі переваги. Але в природі абсолютної чистоти не буває, і різні речовини, потрапляючи в сплав, надають йому, в реалії реаліт, ряд властивостей, які відрізняються від еталонних. В статті визначено характер дії домішок присутніх в сплаві, розкрито позитивні та негативні моменти впливу їх на якість металу. Доречно підкреслити, що умовно домішки ділять на «шкідливі та корисні». З точки зору збройної справи, фосфор та кремній не просто шкідливі, а, насправді, є «отрутою» для сталі, бо підвищують ламкість та сипкість. Але існують речовини, які однозначно підвищують механічні властивості сталей (їх називають легуючими). Як правило, легуючих домішок достатньо десятої або й сотої долі відсотка, щоб різко підвищити твердість, пластичність, здатність протистояти ударам, тертю, стисненню та розтягуванню, високим та низьким температурам і агресивним середовищам. Всі ці моменти детально розглянуто в цій статті.*

*Також визначено найважливіші критерії придатності сталі та доведено, що головним параметром при виборі клинка є твердість, яка досягається загартуванням металу. Цифри нижче 50HRC нас не влаштовують. Але якщо сталь відповідає даному параметру, (>50HRC) то інші властивості настільки тісно пов'язані з процесами кування, загартування, відпуску та ін., що сумніватися в хімічному складі металу немає ніякого сенсу.*

*Також в статті розглянуто та проаналізовано методи загартування металів при виготовленні клинків, що є цікавими і актуальними.*

**Ключові слова:** твердість, високовуглецева сталь, легована сталь, металургія, легуючі домішки, холодна зброя.

**Постановка проблеми.** Тисячоліттями в світі виробляли з металу зброю: мечі, клинки, ножі. З того часу технології весь час коригувалися та вдосконалювалися. В наш час металурги вже прийшли до «порошкової металургії», тобто високовуглецевої легової сталі. Ця сталь успішно використовується для виготовлення бойових, армійських, рибальських або мисливських ножів. Вони користуються попитом, оскільки є максимально гострими та добре тримають заточку. Перевагою такої технології є те, що метал для ножів легко обробляти, і не залишається відходів: Залишки завжди можна переробити на порошок і відновити цикл. Але реалії

сучасного життя показують, що звичні перевірені на ділі марки сталі (та ж 65Г) виявляються непридатними для виготовлення клинків через катастрофічні порушення технології варки. Відповідно майстрам треба дуже прискіпливо підбирати сталь для виготовлення клинків.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням проблемних питань матеріалознавства та металознавства займалися Гуляев А.П., Лахтін Ю.М., В.П.Леонтьев [8; 9] та багато інших вітчизняних та зарубіжних вчених.

Розглянуто багато наукових праць та статей щодо матеріалів для виготовлення холодної зброї та інструменту [1–8].

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам вибору матеріалу для тієї чи іншої холодної зброї, необхідно пояснити читачеві важливість якості матеріалу не тільки на предмет твердості, а й на наявність легуючих елементів (домішок), які відіграють важливу роль у покращенні властивостей готового матеріалу й текстуру збройової сталі, завдяки чому вироби стають міцнішими та твердими.

**Постановка завдання.** На американських та європейських сайтах в числі параметрів, які вказують продавці або виробники дуже рідко зустрічається такий параметр, як твердість сталі. Законодавством цей параметр ніяк не регулюється. Вважається, що це не потрібно звичайному недовідченному покупцю. Але в процесі придбання бойової та мисливської зброї необхідно мати поняття про твердість металів. Зрозуміло, що різні матеріали мають різну твердість і, в залежності від цієї твердості володіють певними властивостями. Для реалізації поставленої цілі в статті детально описаний історичний шлях обробки металів починаючи з кам'яних клинків; дійшовши до пластичної міді (з якої завдяки одному лише куванню отримували тонкі й гострі леза); та прийшовши до порошкової металургії завдяки модернізації та оптимізації технологічних процесів і автоматизації виробництва.

Власне, ця стаття знайомить зброярів з основними властивостями матеріалів, які використовуються для виготовлення клинків, обґрунтовує необхідність правильного його підбору а також знайомить з таким поняттям як твердість металу. В наші дні металургія пропонує широкий асортимент легованих сталей, які перевищують вуглецеві сталі по всім показникам і майже всі з них є нержавіючими. Але не потрібно нехтувати перевіркою твердості у спеціальних акредитованих лабораторіях (в разі відсутності сертифіката із вказанням твердості металу).

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

**Твердість** – це здатність матеріалу протистояти деформації під дією іншого матеріалу з більш високими характеристиками пружності [4].

Поняття **твердості металів** раніше було відомо лише випускникам технічних вузів, робітникам машинобудівних заводів та майстрам ковальської справи. В сучасний побут цей термін увійшов разом з необхідністю сертифікації холодної зброї, де приведені ознаки, на підставі яких ніж може бути віднесений до холодної зброї. Однією з обов'язкових ознак, згідно яких той чи інший

ніж (виріб) може відноситись до холодної зброї є твердість сталі, з якої виготовлений клинок ножа (бойова частина зброї) [10]. І, починаючи з цього моменту зброярі почали цікавитися довідниками, в яких приведені характеристики різних сталей, даються пояснення відмінностей різних порошкових та ламінованих сталей, та, звичайно, вказуються показники твердості сталі (саме те HRC).

Всім відомо, що чим вище процентний склад вуглецю в сплаві металу, тим більш пружна та твердіша буде сталь. Однак людство великий відрізок своєї історії користувалось кам'яними, а пізніше бронзовими клинками [5]. Той, хто думає, що кам'яні ножі були примітивними та убогими – помиляється. Насправді кам'яні інструменти можуть перевершувати сучасні матеріали та виявляти чарівні властивості в самих несподіваних областях. Цим вони зобов'язані надвисокої твердості, в силу чого ріжуча кромка не здатна затупитися, зберігаючи довгий (по суті необмежений) час ступінь гостроти, недоступну для металу. Ясна річ, в хід йде не бруківка, а для виготовлення якісного кам'яного ножа необхідно мати щось склоподібне. Найкращою сировиною вважається вулканічне скло (обсидіан) та кремій (мінеральне утворення, що складається з кристалічного і аморфного кремнезему – опалу, халцедону або кварцу). Експериментально доведено, що ці матеріали здатні давати кромку молекулярної товщини, тобто її гострість абсолютна. Треба сказати, що хірургічні операції з використанням кам'яних лез увінчалися тріумфом (різані операційні рани зростаються набагато швидше, утворюючи тонкі малопомітні рубці).

Не дивно, що сучасні зброярі активно експериментують з керамічними клинками різного складу, як правило, це карбіди, які мають надзвичайно високу твердість.

Суттєвим недоліком каменя є його крихкість, втім, вона ніяк не заважає при нормальному експлуатуванню ножа. Але, зважаючи на цей недолік кам'яні ножі не бувають достатньо довгими. Саме з цієї причини історія так і не побачила кам'яного меча.

З історичних фактів відомо, що пізніше почали користуватися бронзовими клинками [1]. Це досить м'який метал: погано тримає форму та гостроту леза. Тому мідь незабаром витіснив більш міцний сплав міді та олова – бронза. Бронзові сплави постають в неабиякому різноманітті, однак відкинемо досягнення сучасної металургії. Та бронза, якою користувалися в давню епоху – простий двохкомпонентний сплав необхідних

частин міді та олова. Змінюючи процентний склад, можна змінювати механічні властивості кінцевого продукту. В цілому залежність така: чим більше міді, тим бронза м'якша, і навпаки. Необхідно підкреслити, що давні майстри проникли в немислимі тонкощі свого ремесла і користувалися технологічними секретами невідомими (вірніше загубленими) сьогодні. На відміну від процесу виготовлення сталюї зброї, бронзова виливалась в готові форми, відразу ж набуваючи кінцевих контурів. Але боротися такими мечами, як і різати ножем, було зарано – до цього треба було вміло та неквапливо кувати весь клинок, а особливо ріжучі кромки, ущільнюючи кристалічну структуру металу, надавши йому додаткову пружність. Кращі з відомих на сьогоднішній день бронзових виробів мало в чому поступаються сталюим (якщо не брати до порівняння унікальні екземпляри). На протязі тривалого історичного періоду бронзова та сталюа зброя складала конкуренцію одна одній, а досконала технологія бронзи часто перевершувала архаїчну технологію заліза. Нехай час та прогрес взяли своє, але не можна вважати бронзову зброю другорядною [5].

Залізо навчилися обробляти пізніше. Чому? По-перше, мідь і бронза добре піддаються холодному куванню, а залізо потрібно було кувати в розпеченому стані. По-друге, де взяти сировину? В Японії, наприклад, залізний вік почався тільки в VII столітті нової ери: земля була бідна металами. В Європі – набагато раніше. Ще до нашої ери тут знайшли поклади залізної руди. Вперше залізо стали використовувати для виготовлення зброї в Азії, в XII сторіччі до нашої ери. Що ж таке сталь? Це сплав заліза з вуглецем. Завдяки останньому її можна гартувати. Сталь для меча кують при температурі від 850 °C до 1300 °C. Але якщо зараз виробництво дозволяє автоматично контролювати температурний режим і витримувати час загартування, то як із цим справлялися в давнину, щоб кувати мечі? Не повірите, температуру визначали на око – за кольором розжарювання металу [5]. Тому в приміщенні кузні було темно. Наприклад, вишневий відтінок означав, що температура плавлення сталі досягає 800 °C, темно-жовтий – понад 1000 °C, сліпучо білий – більше 1250 °C.

Майстри стежили й за температурою відпуску металу. Тут також є свої нюанси та кольорова градація. Склад збройової сталі в різні часи був різним.

Пізніше до сталі для виготовлення шаблі й меча почали додавати різні добавки – хром, молібден, ванадій, кобальт, вольфрам, нікель та ін.

Вони покращують властивості готового матеріалу й текстуру збройової сталі, вироби стають міцнішими та твердими.

Хром робить сталь стійкою до корозії, молібден перешкоджає ламкості, вольфрам підвищує твердість, ванадій посилює міцність, а кобальт – ріжучі властивості. Головне завдання при виготовленні сплаву – знайти оптимальне поєднання елементів [7]. Ці знання нам доступні сьогодні, а майстри ковальської справи домагалися виплавки ідеальної зброї методом проб і помилок.

Вони стежили за тим, як сталь реагує на зміну температури під час кування клинка. Якщо її розігріти й охолодити повільно, – метал вийде м'яким. Охолодити швидко, зануривши до холодної води, – набуде нечуваної твердості. Недокалити – зламається. Складно? Ще б пак! Але їм це вдавалося.

Отже, практично всі легуючі елементи (домішки) – це метали (хром і ванадій, молібден і вольфрам, марганець, титан, алюміній та цілий ряд інших, більш рідких та вишуканих присадок) і додавання їх в скрупкульозних пропорціях породжує дивовижні феномени.

Розглянемо виготовлення багатошарових клинків з легованої сталі. Виявляється, що це дуже складний процес, оскільки легована сталь не бажає зварюватись ковальським способом, які б вишукані флюси не застосовувались. Тільки звичайний коваль здатен витягнути пластину а потім загартувати в маслі майже готовий виріб. Говорячи про «ковалю» ми самі визначаємо кордони поза якими говорити про клинки не доречно, бо будь-який нормальний клинок ножа, шаблі або меча повинен бути кованим і тільки кованим. Подібної проблеми не існувало ще сто років назад, але тепер, в епоху процвітання прокатних станів, легше відшукати сталюий лист заданої товщини, ніж звичайну кузню [6].

В принципі, катана сталь аналогічна кований – обтиснута в розжареному стані з обох сторін заготовка ущільнюється та набуває майже потрібної структури, але цього замало. З листового прокату можна виготовити пружний та твердий клинок, однак він ніколи не дотягне до кованого. Справа в тому, що, на відміну від прокатного стану концентровані удари молота більш інтенсивно деформують кристалічну структуру, очищуючи її від шкідливих домішок, які ніби «вибиваються» геть. Крім того, із листової заготовки сучасний майстер вимушений тим чи іншим способом вирізати профіль контуру виробу та домогтися певного перерізу за допомогою фрезерування або обдирки

на абразивних кругах. Тобто майстер прибирає залишки металу, залишаючи потрібну частину. Принципово по-іншому вчиняє коваль – він не видаляє залишки, а вбиває їх в клинок, потоншуючи його у напрямленні до леза ножа. Виріб формується із початкової порції металу за рахунок його ущільнення. В результаті ковані клинки, якщо порівняти їх з вирізаними виявляються більш пружними та твердими, легше приймають та довше зберігають заточку, не ламаються та довго не ржавіють. Тому і говориться, що по справжньому якісний ніж повинен мати індивідуально кований клинок.

Окрім цього сучасна традиційна технологія передбачає нагрів заготовок у великих газових печах в печі вогняного факела. Нічим не прикриті сталіні заготовки лежать, розжарюються та стрімко втрачають вуглець, який вигорає. В результаті замість початкового, наприклад 1% – ми отримуємо 0,5%, що не є придатним для якісної бойової зброї. В той же час методика відпалювання металу деревним вугіллем не тільки не випалює вуглець, а навпаки – у верхніх шарах відбувається інтенсивне насичення металу вуглецем. Таким чином, навіть із звичайної «залізчатки» можна отримати якісну сталь. Саме так віками вчиняли ковалі-зброярі, збільшуючи відсотковий склад вуглецю поступово доводячи його до бажаного [5].

Ще одним вагомим недоліком технічного прогресу є повсюдне витіснення деревного вугілля кам'яним, а також коксом. Кам'яне вугілля, а особливо кокс при всій своїй здатності швидко розвивати та довго утримувати високу температуру вмщує стільки сірки, що сталь, при цьому стає непридатною для клинків.

Тепер перейдемо до обговорення марок сталей. Отже для виготовлення ножів, колючих та ріжучих предметів підходить тільки інструментальна або інша «спеціальна» сталь високої якості. Досягнення балансу характеристик процес складний і непередбачуваний для неозначених. Кожен виробник досягає його по-своєму. Наприклад, м'якість означає, що клинок буде постійно втрачати гостроту, хоча буде добре точитися. Надтверді сплави будуть крихкими. Складні хімічні сполуки та високотехнологічні процеси потягнуть за собою підвищення кінцевої вартості.

Розглянемо як хімічний склад впливає на якість сталі [3].

**Вуглець** – найважливіший елемент. Він збільшує твердість та пружність, але підвищує крихкість та знижує корозійну стійкість сплава. Нор-

мальний склад заліза в сталі – не менше 45%, вуглецю – від 0,02% . Сталь, в якій вуглецю від 0,6% до 2,14% називається високовуглецевою. Це тверда сталь. Якщо вуглецю в сплаві буде більше 2,14% – отримаємо не сталь, а чавун

**Хром** – значно підвищує антикорозійні властивості, але значна його кількість приводить до підвищення крихкості. В помірних дозах цей елемент присутній практично у всіх марках нержавіючої сталі.

**Марганець** – забезпечує хорошу опірність та зношування. Без його використання не обходиться ні одна сучасна марка сталі.

**Молібден** – відповідає за формування карбідів, які запобігають крихкості та ламкості сталей та забезпечують міцність, як у звичайних умовах, так і при високих температурах. Підвищує корозійну стійкість, твердість та ударну в'язкість і робить сталь зручнішою в обробці.

**Нікель** – здатний підвищити показники міцності, ударної в'язкості та корозійної стійкості.

**Кремній** – підвищує міцність та стійкість до зношування.

**Ванадій** – сприяє формуванню структури карбідів, що підвищує зношування та забезпечує багаторічне використання холодної зброї.

Кожний із компонентів виконує свою роль. Різні хімічні елементи («Корисні домішки») у необхідних пропорціях допомагають наділити ножову сталь необхідними властивостями.

Нижче приведені найбільш популярні марки сталей, які використовуються у виробництві: **вуглецеві** – У7 ÷ У13 ; **леговані** – 40Х13, 65Х13, 95Х18, 65Г, Р6М5, Х12МФ, ХВ5; **високолеговані** – 20Х17Н2, 12Х18Н10Т, Р6М5, Р18, Р14Ф4 .

Однозначно придатні всі типи ресорно-пружинних та жаростійких сталей, але під питанням всі типи конструкційних сталей. Достатньо сказати, що дагестанські зброярі на початку ХХ століття кращим матеріалом для своїх знаменитих клинків вважали пружини для локомотива, які відслужили свій строк.

**Висновки.** Хороший бойовий ніж це поєднання багатьох складових, в числі яких можна згадати такі важливі елементи як загальний дизайн та конструкція, форма клинка та його заточка. Без сумніву, одним із найважливіших параметрів є матеріал, з якого виготовлений ніж.

Сталі, які використовують як зброярі, так і промисловість, яка цим займається, дуже різноманітні. Джерела інформації мають безліч маркувань, які означають той чи інший сорт, виготовлений в тій або іншій країні. Цей факт пояснюється

тим, що у кожній країні-виробника історично склались свої власні традиції та технології металообробки і створення сталевих сплавів. Не менш частою причиною різноманітності існуючих на ринку сталей є і маркетинг. Адаже в умовах жорсткої конкуренції між виробниками, необхідно наповнювати всі наші ринки якомога більшим асортиментом продукції, яка заздалегідь є способом виживання тої чи іншої торгової марки. При спробі дізнатися побільше щодо різних сортів сталей, необхідно розуміти, що ділення марок сталей на хороші і не дуже тут не доречно. Характерис-

тики кожного сплава є поєднанням певного переліку властивостей, співвідношення яких визначають цілі, які необхідні виробнику в кожному конкретному випадку. На ті чи інші якості чергового сорту сталі в рівній мірі можуть впливати, як наявність тих чи інших матеріалів та технологій у виробника, так і галузь використання нового продукту. Створення сталевих сплавів – це пошук компромісів та балансу, оскільки ідеалів просто не буває, а максимальні показники – це не зовсім те, що підходить для практичного використання та продажу холодної зброї.

#### Список літератури:

1. Все о холодном оружии. *Материал клинка*. URL: [https://stilet.pp.ua/korotko-o-nozhax/26-klinki\\_2/404-material-klinka.html](https://stilet.pp.ua/korotko-o-nozhax/26-klinki_2/404-material-klinka.html)
2. Марки стали. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades>
3. Вітчизняні сталі для ножів. *Рекламно-інформаційне видання Фортуна*. URL: [https://fortuna-gazeta.com.ua/articles/metal\\_kupit/#:~:](https://fortuna-gazeta.com.ua/articles/metal_kupit/#:~:)
4. Что такое твердость клинка и HRC? URL: <https://x-gear.com.ua/cto-takoe-tverdost-klinka-i-hrc>
5. Мечі, ножі, клинки: загартування збройової сталі. URL: <https://metinvestholding.com/ua/media/article/hardening-weapon-steel>
6. Енциклопедія сучасної України. *Інструментальні сталі*. URL: [https://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=12375](https://esu.com.ua/search_articles.php?id=12375)
7. Склад сталі, її властивості і класифікація. URL: <https://iron-group.com.ua/uk/articles/sostav-i-vidy-stali>
8. *Металознавство*. Гуляев А.П. М., 1986.
9. *Матеріалознавство*. Ю.М. Лактін, В.П. Леонт'єв. М.: Машинобудування, 1972. С. 510.
10. Кузьменко Т.М. Сертифікація холодної зброї. *Вчені записки Таврійського університету імені Вернадського, серія: Технічні науки*, том 33(72) № 1, 2022.

#### Shornikova S.V., Kuzmenko T.M. CHOICE OF MATERIAL CLICK WHEN MANUFACTURING MOLDED WEAPONS

*One of the important factors inherent in edged weapons is the material from which knife blades are made. The article is specifically about the choice of blade material for the manufacture of military, army, fishing, or hunting weapons. Any person from a young age knows that knives are made of iron, or rather, an alloy of iron and carbon, that is, steel. And the greater the percentage of carbon in the alloy, the more elastic and hard (after heat treatment) our steel. It is clear that only high-carbon steel is suitable for the manufacture of blades, which, as a result of heat treatment, acquires elasticity and hardness. Ideally, the amount of impurities in the alloy should be zero – such a steel will have the maximum possible advantages. But in nature, absolute purity does not exist, and different substances, getting into the alloy, give it, in the end, a number of properties that differ from the reference ones.*

*The article defines the nature of the action of impurities present in alloys, reveals the positive and negative aspects of their impact on the quality of the metal. It is appropriate to emphasize that conventionally impurities are divided into “useful and harmful”. From the point of view of weaponry, phosphorus and silicon are not only harmful, but in fact are a “poison” for steel, because they make it brittle and brittle. But there are substances that uniquely improve the mechanical properties of steel (they are called alloying). As a rule, alloying impurities are enough tenth or even a hundredth of a percent to dramatically improve hardness, ductility, resistance to impact, friction, squeezing and stretching, high and low temperatures and aggressive environments. All these points are discussed in detail in this article. Also, the most important criteria for the suitability of steel are determined and it is proved that the main parameter when choosing a blade is hardness, which is achieved by heat treatment of the metal. Numbers below 50HRC do not suit us. But if the steel meets this parameter (>50HRC), then the other properties are so closely related to the processes of forging, heat treatment, annealing, etc. that there is no point in doubting the chemical composition of the metal. The article also discusses and analyzes the methods of heat treatment of metal in the manufacture of edged weapons, which is interesting and relevant.*

**Key words:** *hardness, carbon steel, alloy steel, metallurgy, alloying impurities, edged weapons.*

# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/05>**Бодак Є.Є.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лебедев Д.Ю.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У роботі розглянута концепція побудови пристрою, який представляє з собою систему контролю енергоспоживання від відновлювальних джерел енергії. Розглянуто декілька можливих комплектації в залежності від вимог. У роботі вказано структурні схеми та алгоритми роботи елементів системи, подано концепцію програмного забезпечення для контролю енергоспоживання. Сама робота має змінити ваші погляди на всі автономні прилади та системи, з метою їх покращення та модернізації. У роботі проаналізовано склад сучасних систем контролю енергоспоживання відновлювальних джерел енергії та принципи їх роботи. Також в цій роботі описані головні проблеми вже розроблених систем та їх аналогів. Розгляд цих проблем стане корисним і як для модифікації існуючих систем так і для розробки нових підходів пов'язаних з темою цієї роботи.

Відповідно тому, з якою швидкістю йде розвиток в сфері енергетики, ІТ, інженерії ми зобов'язані донести наші ідеї і напрацювання до кожного хто б це не був. Відновлювальна енергетика це сфера яка тільки починає розвиватися в Україні, тому потрібно розробляти актуальні на наш час рішення. Розробки нашої держави повинні стати передовими у світі, як у сфері авіації, космонавтики та сільсько-господарського виробництва. Поширення видобутку енергії з відновлюваних джерел енергії позитивно впливає на економіку країни та комунальні послуги, тобто розробки в цій сфері є покращенням для споживачів та постачальників. Зелений тариф, який вже не новизна для нас, може стати доступним кожному, а не лише для середнього та великого бізнесу, тобто кожен може стати постачальником енергії, при цьому зникає монополія на енергетичні ресурси. Враховуючи, що на різних ділянках різні умови для роботи генераторів, перспективним є створення сервісу аналізу показників для вибору найбільш ефективних територій на яких краще використовувати генератори: вітряні, сонячні, гідроелектростанції.

**Ключові слова:** система контролю, електростанція, автономні прилади, вітряні електростанції, сонячні електростанції, гідроелектростанції.

**Постановка проблеми.** Огляд ринку відновлювальних джерел енергії показує, що системи контролю енергоспоживання саме у відновлювальній енергетиці перестали модернізуватися та оптимізуватися елементи інтелектуального управління. Використання побутових інверторів і примітивних контролерів, саме з цим стикаються люди на момент пошуку.

Розробка компактної електростанції складається з компонентів, що крок за кроком відповідають за отримання, перетворення, накопичення, вивільнення природної енергії. Отримана енергія від генераторів потрапляє до контролера,

який розподіляє заряд по блокам акумуляторів. Накопичена енергія потрапляє до інвертора, а від нього до споживача. Від кількості підключень залежить складність системи, але використовувати комбіновані генератори потрібно належним чином.

Комбінованих контролерів досить мало [1], а коли користувач хоче отримувати достатню кількість енергії він починає об'єднувати різні системи в одну. Додатковою причиною розробки є витрати на готові рішення та відсутність методів аналізу роботи системи. Тому головними проблемами дослідження є:

- Значні витрати на систему для великих об'ємів енергії
- Відсутність методів діагностики
- Відсутність модернізацій без впливу на закріплену гарантію.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед постачальників електростанцій могу виділити три групи:

- Перша група займається повним розрахунком та встановленням систем, це фірми: Eco Tech, Green West, Sunsay Energy, Solar System, Kworum, Alteco.
- Друга група є постачальником комплектів для встановлення самостійно: Sun Servis, Ніка-Грант, TERMOS.
- Третя група це продукція вузького спрямування, тобто окремі комплектуючі системи, наведення вони не потребують так як їх занадто багато і вони нічим не виділяються на відміну від двох попередніх груп.

Майже всі постачальники мають примітивну електричну схему, малий простір для зміни налаштувань [2]. Одиниці мають хоча б систему віддаленого контролю та логіку для аварійних ситуацій. Системи які коштують з 6000 до 7000\$ не сильно відрізняються від тих самих систем за 1000\$, такий сильний вплив на ціну пов'язаний з різною потужністю.

Окремо розглянемо, що пропонують на ринку передові компанії. Серед постачальників сонячний електростанцій виділяються Green West, Sunsay Energy, Solar System, Sun Servis, Ніка-Грант, TERMOS, серед вітряних постачальників лише Kworum та гібридними системами займаються Alteco, Eco Tech.

Наш напрямок розробки це автономні гібридні електростанції. Alteco має певні комплектації різні по потужності, ось приклад (рис. 1):

Найменування	Вартість, \$.
Вітрогенератор Flamingo Aero - 6.7 (4 кВт) – 1 шт.	8 360,00
Щогла для вітрогенератора (23 м) – 1 шт.	3 356,00
Сонячна батарея LDK solar 250PA – 12 шт.	2 664,00
Контролер заряду Xantrex XW-MPPT 60-150 – 1 шт.	584,93
Інвертор с ЗП Conext 6,8 kW 48VDC 230VAC XW8548E – 1 шт.	3 816,75
Акумуляторна батарея SIAP PzS 4 APH 500 (2В 500А) – 48 шт.	7 510,00
<b>Всього:</b>	<b>26 291,68</b>

Рис. 1. Приклад комплекту на встановлення

Ціна такого комплекту занадто велика навіть для потужності в 6.7 кВт. По розрахунку, для отримання такої потужності з наших систем знадобиться 4 контролера, так це більше чим пропо-

нує Alteco, але наші 4 контролера підключаються між собою і не потребують додаткових налаштувань, вони можуть бути як окремими джерелами на вашій ділянці так і одним джерелом. Вартість однієї системи з сонячною панеллю і вітрогенератором 1600 \$,  $1600 * 4 = 6400$  \$, різницю в ціні видно. Контролер, який постачає Alteco має пам'ять історії на 128 днів, в той час наша система зможе берегти дані на протязі декількох років з можливістю аналізу роботи та виведенням графіків споживання.

**Постановка завдання.** З попереднього розділу ми отримали підтвердження головних проблем і можемо сформулювати їх рішення. Додатково, споживач має бути рішучим, щоб перейти повністю на зелену енергетику, але таке трапляється дуже рідко, особливо на момент розрахунку скільки це буде коштувати, тому додатковою задачею є зацікавлення майбутнього користувача.

- Розробка приладу та його опис
- Розробка інтерфейсу
- Розробити засіб розширення системи

**Виклад основного матеріалу по розробці.**

Розглянемо розроблювану систему від самого початку. На вході системи є два джерела, це сонячна панель на 400-600 Вт та вітряний генератор н 1-2 кВт. Наступним елементом після генератора є контролер заряду і розподілу енергії. Сам контролер (рис. 2) має складатися з двох відсіків: акумуляторний, керувальний.

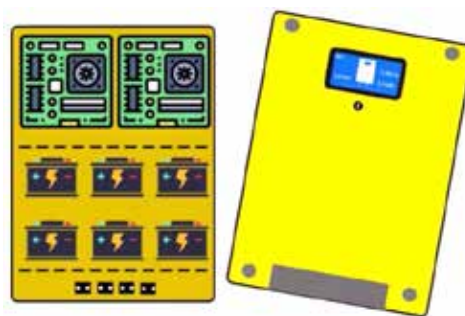


Рис. 2. Ескіз контролера

Як показує практика краще всього використувати гелеві акумулятори, вони стійкі до глибоких розрядів та компактні. В залежності від того в яких умовах експлуатації буде акумуляторний відсік, можна встановити час його роботи на відмову.

Принципова схема інвертора, який входить до блоку керування разом із контролером, наведена у [3] на 3 кВт, генератор виконаний на мікросхемі IC1 – TL081, далі через вузли мікросхем частота



ділиться надвоє і виходить вже два протифазні сигнали на затвори драйверів вихідних ключів.

Далі з драйвера сигнал надходить на затвори силових ключів, виконаних на IRF3205, по 8 штук у кожному плечі. Особливо хочеться відзначити живлення генератора і драйвера, яке здійснено стабілізатором на 9 В [4], на яке надходить напруга близько 24 В, яку подає генератор, що підвищує напругу, на мікросхемі IC10, далі через підсилювач подається на помножувач і випрямляч напруги на діодах D8-D1. Зроблено це для того, щоб при падіннях напруги живлення ключів і генератора було стабільно 9 вольт, яке при великих навантаженнях може впасти до небезпечного мінімуму порога включення ключів і привести до пробою силових ключів. Більшість пробоїв ключів саме від того, що при великому навантаженні “просідає” напруга відкриття польових транзисторів. В інверторі є захист від перевантаження, короткочасне пікове навантаження може досягати до 6 кВт. У схемі є захист від перевантажень по виходу, є захист у вигляді запобіжника на 250 А і датчик струму транзисторів у вигляді опору R20, з нього знімається сигнал для управління захисту по струму який потрібен контролеру.

Система (рис. 3) базується на мікроконтролері STM32f401 [5]. Контролер, за рахунок програмної логіки та інтерфейсу керує зарядом акумулятора [6], а також імпортує дані: вхідної та вихідної напруги, частоти на виході, відсотку заряду акумулятора. Програмна логіка розраховує параметри для зручного користування. Також разом з контролером працює ESP32, який використовується для отримання даних від STM, та надсилання їх на сервер.

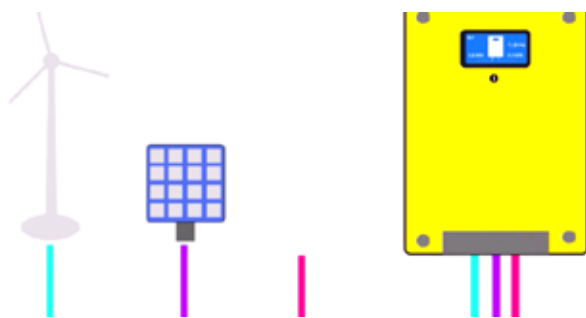


Рис. 3. Ескіз системи

Комунікація з контролером відбувається по каналам Wi-Fi та RS485. Фізичний інтерфейс потрібен для обміну даних між контролерами, які входять до різних систем.

Контролери передають дані між собою для сповіщення користувача про готовність системи і передачі показників роботи. Поки один із контр-

олерів в режимі підзарядки від джерела, то другий має переключатися в режим експорту енергії, тим самим виграти час для першого контролера. Якщо потреби мережі більші ніж може дати один контролер, то на експорт перемикаються всі можливі. Тобто вирішена проблема з розширенням системи без втручання та впливом на гарантію.

Інтерфейс користувача може бути у любому виконанні, але важливо винести основні дані на екран. Зображення параметрів доступне на дисплеї контролера (рис. 4–8), сервері, сайті користувача, та мобільному додатку.

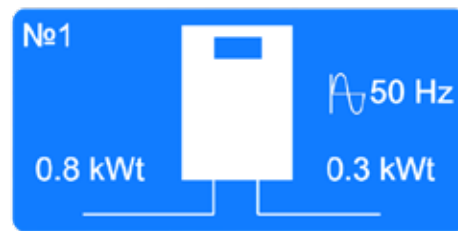


Рис. 4. Ескіз інтерфейсу № 1

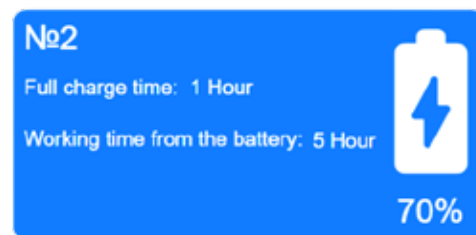


Рис. 5. Ескіз інтерфейсу № 2

Прилад передає не оброблені дані для збереження в базу даних і на їх основі проводяться розрахунки. Деякі дані розрахувати в реальному режимі часу не має можливості. Наприклад, швидкість вітру, ми маємо розрахувати дані генерації, які надсилаються на базу з певною затримкою, тому точний розрахунок ми проводимо на приладі, а сервер методом порівняння потужності генерації виводить дані. Скорочення обсягу даних передачі пов'язане з кількістю пакетів які потрібно надсилати за один період зчитування.

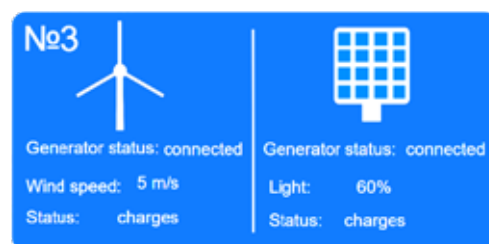


Рис. 6. Ескіз інтерфейсу № 3

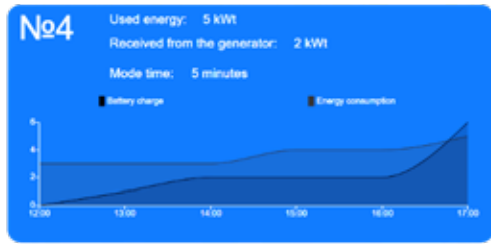


Рис. 7. Ескіз інтерфейсу № 4

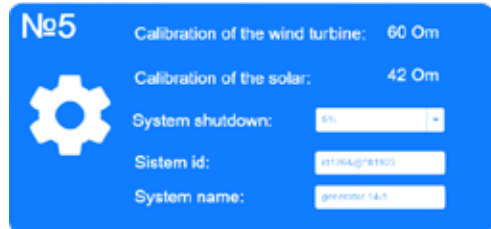


Рис. 8. Ескіз інтерфейсу № 5

За основу бази даних використовуємо платформу firebase, також на цій платформі ми можемо розмістити хостинг. Платформа зручна тим, що розробка для візуальної і функціональної частини коду може виконуватись на всіх доступних мовах програмування. Для роботи з приладами є готові бібліотеки для пришвидшення розробки, так ESP32 можна під'єднати до бази за лічені години, використовуючи ідентифікатор бази яку ви створили. Дані можна розподіляти по текам, проводити розрахунки та відобразити їх у графічній частині. На рисунку 9 зображено ескіз мобільного додатку а на рисунку 10 ескіз інтерфейсу серверної частини.

Систему можна комбінувати та розширювати (рис. 11), тим самим вирішується проблема значних витрат на великі об'єми, так як ціна комплекту статична. Наведемо можливі типи з'єднання системи (рис. 12).



Рис. 9. Ескізи інтерфейсу мобільного додатку



Рис. 10. Ескіз інтерфейсу серверної частини



Рис. 11. Блок-схема з'єднання елементів системи

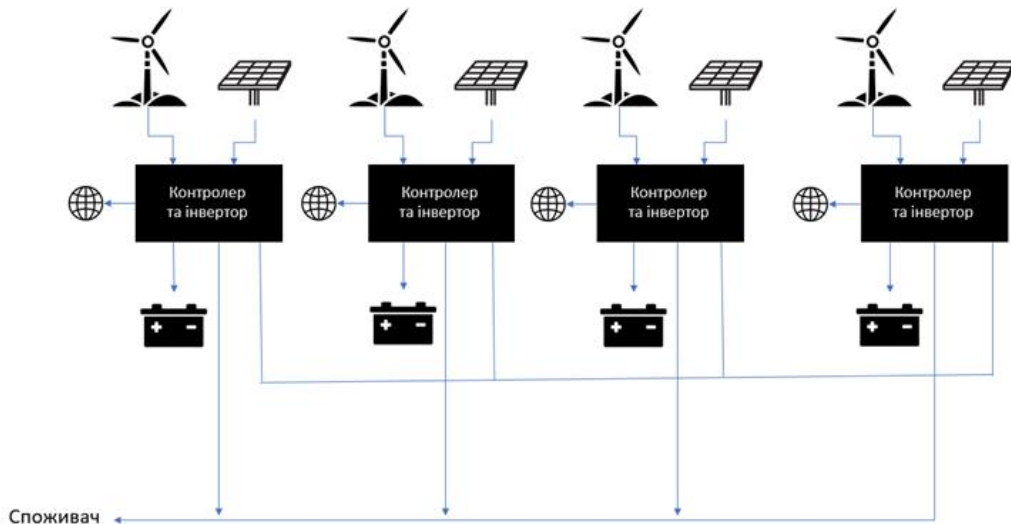


Рис. 12. Блок-схема з'єднання для «енерго ферми»

В першому варіанті ми отримуємо контролер, два генератора, в сумі система на виході матиме 1-2 кВт, цього достатньо для невеликого дому або майстерні. У випадку недостатньої потужності, контролер можна доповнити ще одним комплектом і розширити то потрібного енергоспоживання.

У випадку розширення до ферми, алгоритм роботи змінюється, система аналізує яка енергогенерація та задає потрібну кількість контролерів. Доречно розширити функціонал системи, так як потрібно багато гнучких налаштувань та додаткові порти підключення. Одним із різновидів використання системи може стати встановлення контролера у багажний відділ автомобілю і перевезення сонячної панелі, це може стати універсальним рішенням для виїзду на природу, подорожі або для проведення ремонтних робіт у місцях де відсутня електроенергія.

Серед функцій систем потрібно відмітити наступні можливості, які потрібні додати.

*Енергозберігаючий режим* потрібен для відключення живлення дисплею в час коли інформація користувачеві не потрібна та в нічний час, так як перегляд даних можливий з мобільного додатку.

*Функція виявлення джерела* за наявності опору обмоток генератора, система повинна ідентифікувати нове з'єднання автоматично.

*Перезавантаження системи по внутрішньому таймеру* потрібне у разі зависання системи при виконанні не повної програми.

*Статистика споживання* за день, місяць, рік з підсумками для аналізу споживачем.

*Калібрування генератора* у випадку, якщо користувач отримує не вірні дані. Калібрування можна запустити в ручну, або встановити автокорекцію, щоб система сама виявляла прорахунки.

*Захист від відключення*, система дає сигнал, що майже розряджена і генерації немає.

*Встановлення відсотку збереження*, це продовження попередньої функції, значення встановлене користувачем і не може бути меншим ніж 5% від заряду, тому що контролер живиться від цієї енергії себе, і у разі появи генерації система зможе продовжити роботу.

**Висновки.** Розробка системи контролю енергоспоживання для відновлюваних джерел енергії є перспективним напрямком роботи. У статті виявлено основні проблеми електростанцій на відновлюваних джерелах енергії, проведено аналіз приладів які є на ринку, розробили опис та ескізи приладу.

Спроектвана система контролю енергоспоживання і генерації складається: портативна система яка має два входи для генераторів, можливість з'єднання з іншими системами для створення «енерго ферми» з можливістю аналізу та контролю електроспоживання в реальному часі.

Створена концепція побудови системи дозволяє перейти до безпосередньої розробки такого приладу.

#### Список літератури:

1. Алтухова Т.В., Скрипник С.А. Создание инновационной модели солнечно-ветрового воздушного комплекса для энергоснабжения промышленных предприятий. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Київ: ТНУ, 2018. Том 29. № 3/2018 (68). С. 61–65.

2. Генератори GreenChip UA. URL: [https://dok.ua/art-cma736ir-msg-3093770?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=9079020200&utm\\_content=&utm\\_term=&utm\\_id=413870348346&gclid=CjwKCAjwjOTBhAvEiwASG4bCCcVE8LGT7L5oPtgzFRhdH26Jh3k\\_yW5RCCzH1IUfS\\_uql4U6olZhoCICkQAvD\\_BwE](https://dok.ua/art-cma736ir-msg-3093770?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=9079020200&utm_content=&utm_term=&utm_id=413870348346&gclid=CjwKCAjwjOTBhAvEiwASG4bCCcVE8LGT7L5oPtgzFRhdH26Jh3k_yW5RCCzH1IUfS_uql4U6olZhoCICkQAvD_BwE)
3. Схема інвертора. URL: <https://www.tool-electric.ru/2016/01/12220-3000.html>
4. Стабілізатор напруги. URL: <https://cxem.net/pitanie/5-158.php>
5. Специфікація STM32f401. URL: [https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Stm32f401&gclid=Cj0KCQjwsdiTBhD5ARIsAIpW8CIfsQRa9mL\\_Hj6Fd3Nt4leknL6TKjLa2u02iZEIRpIfeOcp6AiXLdoaAh4PEALw\\_wcB](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Stm32f401&gclid=Cj0KCQjwsdiTBhD5ARIsAIpW8CIfsQRa9mL_Hj6Fd3Nt4leknL6TKjLa2u02iZEIRpIfeOcp6AiXLdoaAh4PEALw_wcB)
6. Приклад батареї. URL: [https://secur.ua/akkumuljatornaja-batareja-energenie-12v-9ah-bat-12v9ah.html?gclid=Cj0KCQjwsdiTBhD5ARIsAIpW8CKb0oL57x2FEk2XgktKXgG8-7qqyb0ULYXj5rd16xkujSRIYyTqj3gaAgOREALw\\_wcB](https://secur.ua/akkumuljatornaja-batareja-energenie-12v-9ah-bat-12v9ah.html?gclid=Cj0KCQjwsdiTBhD5ARIsAIpW8CKb0oL57x2FEk2XgktKXgG8-7qqyb0ULYXj5rd16xkujSRIYyTqj3gaAgOREALw_wcB)

### **Bodak Ye.Ye., Lebedev D.Yu. DEVELOPMENT OF ENERGY CONTROL SYSTEM FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES**

*The concept of construction of the device which represents system of control of energy consumption from renewable energy sources is considered in work. Several possible configurations depending on the requirements are considered. The structural schemes and algorithms of operation of system elements are specified in the work, the concept of the software for control of power consumption is given. The work itself should change your views on all stand-alone devices and systems, in order to improve and upgrade them. The composition of modern systems of control of energy consumption of renewable energy sources and the principles of their work are analyzed in the work. This paper also describes the main problems of already developed systems and their analogues. Addressing these issues will be useful both for modifying existing systems and for developing new approaches related to the topic of this paper.*

*According to the speed with which we develop in the field of energy, IT, engineering, we are obliged to convey our ideas and achievements to everyone. Energy is a field that is just beginning to develop in Ukraine, so we need to develop relevant solutions today. Perhaps the development of our state will be advanced in the world, as aviation and agricultural production. The proliferation of energy from natural sources can have a good impact on the country's economy and utilities, ie developments in this area are an improvement for consumers and suppliers. The green tariff, which is no longer a novelty for us, can be made available to everyone at no extra cost. Also in the order it is specified that everyone can become the supplier of energy, that is in addition with availability the monopoly on energy disappears. Given that the sites have different conditions for the operation of generators, there may be a service with indications for which areas it is better to use generators: wind, solar, hydropower.*

**Key words:** control system, power plant, autonomous devices, wind power plants, solar power plants, hydroelectric power plants.

**Гарист А.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## АНАЛІЗ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH

*В області телекомунікацій технологія Bluetooth є техніко-промисловим стандартом передачі даних для персональних бездротових мереж (Wireless personal area network, WPAN). Ця технологія забезпечує стандартний, економічний та безпечний спосіб обміну інформацією між різними пристроями за допомогою безпечної радіочастоти ближньої дії. Разом з розвитком технології розвивалися також і кіберзагрози. У 2010-х роках були виявлені перші вразливості технології Bluetooth, які дозволяли отримати контроль над пристроєм.*

*Bluetooth-пристрої оточують нас повсюди, це колонки, розумні годинники, фітнес-браслети та навушники. У зв'язку із цим функція Bluetooth на пристрої залишається завжди активною. Пристрої обмінюються даними між собою, завантажуючи якусь частину в додатки. У той же час Bluetooth-з'єднання дуже вразливе і може стати причиною зламу пристрою. Це дозволяє завантажити шкідливі програми та відстежувати не тільки місцезнаходження власника, але й читати особисте листування, дані банківських карт та облікових записів.*

*Bluetooth корисний у повсякденному житті, але досить вразливий, як і Wi-Fi підключення. Зловмисники використовують спеціальні програми, які допомагають знайти активні Bluetooth-з'єднання поблизу. Вони не тільки бачать, хто є поруч, але й можуть відстежувати, до яких пристроїв та мереж пристрій підключався раніше. Це досить серйозно, адже пристрій розглядає ці підключення як довірені та підключається до них автоматично, коли вони поряд.*

*В даній статті представлені результати аналізу вразливостей протоколу Bluetooth. Зазвичай атаки на пристрої відбуваються в людних місцях. Шахраї заздалегідь прораховують план дій і готують пристрій, з якого планується злам. Для цього підходить скинутий до заводських налаштувань планшет або смартфон. Отримані дані можуть бути використані для шахрайства або зламу банківських облікових записів. З кожним роком доступних пристроїв стає дедалі більше, а зловмисники вигадують нові способи зламу.*

**Ключові слова:** Bluetooth-з'єднання, вразливість, злам, протокол, аутентифікація, шифрування.

**Постановка проблеми.** Стандарт Bluetooth, включаючи його недавню еволюцію – Bluetooth Low Energy (BLE), продовжує використовуватись на великій кількості пристроїв. З багатьох стандартів зв'язку для з'єднання двох пристроїв Bluetooth характеризується простотою використання та великими можливостями.

Незважаючи на те, що для передачі даних в основному використовується технологія Wi-Fi, яка використовує свої протоколи шифрування, проблеми безпеки технології Bluetooth будуть залишатися актуальними ще довгий час, так як вона використовується на мільярдах пристроїв усіх типів. В статті розглянуті вразливості цієї технології, а також опис можливих атак, надані приклади застосування цих вразливостей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перший злам Bluetooth-пристрою здійснив громадянин Великобританії Оллі Уайтхаузу у квітні 2004 року. Запропонована ним методика мала серйозний недолік, злам ставав можливим лише

в тому випадку, якщо зловмисник отримував можливість перехопити два пристрої безпосередньо перед їхньою першою взаємодією один з одним – процедурою з'єднання, при якій вони обмінюються ідентифікаційною інформацією. Якщо перше з'єднання було встановлено поза межами досяжності зловмисника, подальший обмін даними між двома пристроями ризику не представляв.

У 2017 році компанія Armis виявила так звану вразливість BlueBorne, яка торкнулася пристроїв з Bluetooth з'єднанням на операційних системах Android, iOS, Linux і Windows. Було підраховано, що на той час потенційно вразливих пристроїв становить близько 8,2 мільярди.

Дослідники з німецької компанії ERNW (Enno Rey Netzwerke), виявили вразливість у Bluetooth на Android-пристроях. Експлуатація вразливості дозволяє зловмиснику, який знаходиться в радіусі дії Bluetooth, отримувати доступ до даних, що зберігаються на пристрої, а також робить мож-

ливим завантаження шкідливого програмного забезпечення, причому без будь-яких дій з боку жертви. Цю вразливість було виявлено в листопаді 2019 року, після чого дослідники повідомили про неї розробників із компанії Google. Зрештою, проблема була вирішена у лютневому оновленні безпеки для платформи Android.

У серпні 2021 року група дослідників безпеки опублікувала докладну інформацію про набір з 16 вразливостей, які впливають на стек програмного забезпечення Bluetooth. Ці вразливості стали відомі під загальною назвою BrakTooth та дозволяють зловмисникам виводити з ладу пристрої або запускати шкідливий код і захоплювати цілі системи.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам вразливостей технології Bluetooth, стрімкий розвиток технологій зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є аналіз вразливостей технології Bluetooth в режимі реального часу і виявлення нелегітимної активності з можливістю блокування несанкціонованих повідомлень або оповіщення. Метою аналізу є своєчасне виявлення потенційних загроз і реагування на них, не надаючи негативного впливу на функціонування мережі.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Bluetooth – це технологія бездротового зв'язку малого радіусу дії, яка дозволяє здійснювати обмін даними між фіксованими та мобільними пристроями. З швидким розвитком Інтернету речей (IoT) технологія Bluetooth також прискорила темпи свого розвитку, щоб адаптуватися до ринку, що постійно зростає і потреб користувачів. Розробники постійно працюють над збільшенням швидкості передачі даних, щоб технологія Bluetooth могла краще інтегруватися до різних пристроїв IoT.

Розглянемо процедуру встановлення з'єднання за технологією Bluetooth.

Процедуру встановлення з'єднання або інакше кажучи ініціалізацію з'єднання Bluetooth можна розділити на три етапи:

- генерація ключа Kinit;
- генерація ключа зв'язку – link key;
- аутентифікація.

Етапи генерації ключів Kinit та link key входять до процедури з'єднання. Під час цієї процедури відбувається процес зв'язку двох (або більше) пристроїв з метою створення загального секретного значення Kinit, яке вони будуть вико-

ристовувати при спілкуванні. Перед з'єднанням з обох боків необхідно ввести PIN-код. Kinit формується за алгоритмом E22, який оперує наступними величинами:

- BD\_ADDR – унікальна адреса Bluetooth-пристрою (довжина 48 біт);
- PIN-код та його довжина;
- IN\_RANDOM (довжина 128 біт).

Для створення ключа зв'язку пристрої обмінюються 128-бітними словами LK\_RANDOM(A) і LK\_RANDOM(B), що генеруються випадковим чином. Далі йде побітова операція XOR із ключем ініціалізації Kinit і знову обмін отриманим значенням. Потім обчислюється ключ за алгоритмом E21.

На даному етапі процедура з'єднання закінчується і починається останній етап ініціалізації Bluetooth – взаємна аутентифікація, яка заснована на схемі запит-відповідь. Один із пристроїв стає верифікатором, генерує випадкову величину AU\_RANDOM(A) і надсилає його сусідньому пристрою. Як тільки пред'явник одержує це «слово», починається обчислення величини SRES за алгоритмом E1 і відправляється назад верифікатору. Сусідній пристрій здійснює аналогічні обчислення та перевіряє відповідь пред'явника. Після чого процедуру встановлення з'єднання вважатиметься закінченою.

В технології Bluetooth для захисту з'єднання передбачені деякі механізми, такі як шифрування даних та авторизація пристроїв. Також алгоритм псевдовипадкового переналаштування робочої частоти (Frequency Hopping Spectrum Spreading – FHSS), на основі якого працює Bluetooth, входить в систему захисту конфіденційності при передачі інформації: перехід між несівними частотами відбувається за псевдовипадковим алгоритмом і визначається індивідуально для кожного з'єднання. Шифрування в Bluetooth відбувається за допомогою ключа, ефективна довжина якого – від 8 до 128 біт. Це дозволяє встановлювати рівень стійкості результуючого шифрування, що відповідає законодавству кожної країни. Тому правильно налаштовані Bluetooth-пристрої спонтанно з'єднуватися не можуть і тому випадкових витоків інформації до сторонніх осіб статися не може.

Класична технологія Bluetooth може працювати в одному з чотирьох режимів безпеки:

Режим 1 – (не захищений) зазвичай використовується за замовчуванням. У цьому режимі не використовується ні шифрування, ні аутентифікація, а сам пристрій працює в ширококомовному режимі. Найчастіше використовується лише для тестування. Існує для підтримки зворотної сумісності із застарілими пристроями.

Режим 2 – захищений на рівні програми/служби. У цьому режимі після встановлення з'єднання менеджер безпеки здійснює аутентифікацію, що дозволяє обмежити доступ до пристрою.

Режим 3 – захищений лише на рівні каналу зв'язку. В даному випадку аутентифікація проводиться до встановлення з'єднання, при цьому застосовується прозоре шифрування, але навіть за такого режиму пристрій може бути зламаний.

Режим 4 – це удосконалений режим безпеки 2. Функції безпеки реалізуються після встановлення з'єднання. Для того, щоб згенерувати ключ з'єднання використовується протокол Діффі-Хеллмана на еліптичних кривих (Elliptic curve Diffie–Hellman, ECDH).

У всіх специфікаціях Національний інститут стандартів та технологій США (NIST) рекомендує використання саме режиму 4. Основою захисту з'єднання є процедура генерації ключів при встановленні з'єднання.

Розглянемо основні найбільш розповсюджені методи атаки, якими активно користуються зловмисники.

Bluejacking – атака, під час якої шахрай використовує з'єднання для проникнення в телефон та надсилання анонімних повідомлень на інші пристрої, що знаходяться поблизу. Такі атаки можуть використовуватись для дорогих дзвінків до інших країн.

Bluesnarfing – злам, що супроводжується крадіжкою конфіденційної інформації, наприклад інтернет-акаунтів, фотографій та відео. Дана атака переважно використовує недоліки в програмному забезпеченні пристроїв.

Bluebugging – найгірший варіант, при якому зловмисник має можливість контролювати пристрій, прослуховувати смартфон і отримувати доступ до всіх даних, які є в його пам'яті. Спочатку bluebugging був зосереджений на підслухуванні чи прослуховуванні комп'ютера з підтримкою Bluetooth. Зі зростанням використання смартфонів кіберзлочинці переключилися на злам мобільних телефонів. Ця атака часто обмежена через діапазон Bluetooth-з'єднання, що досягає всього 10–15 метрів. Деякі зловмисники використовують антени-підсилювачі для розширення діапазону атаки.

Bluetoothjacking – це відносно нова техніка, яка дозволяє зловмисникам заблокувати та взяти під контроль будь-який пристрій Bluetooth з низьким енергоспоживанням (BLE).

Blueprinting – атака, яка дозволяє отримати детальну інформацію про віддалений пристрій.

Як уже зазначалося раніше, кожен Bluetooth-пристрій має унікальну Bluetooth-адресу. Ця адреса складається з 6 байт і зазвичай представляється, подібно до MAC-адреси, у форматі MM:MM:MM:XX:XX:XX. Перші три байти, зазначені як M, містять відомості про виробника мікросхеми. На жаль, з трьома байтами X, що залишилися, не все так просто, і модель пристрою не можна визначити однозначно. Проте, кожен Bluetooth-пристрій надає ті чи інші послуги. Які саме можна дізнатися через SDP (Service Discovery Protocol). На запит про сервіси можна отримати інформацію певного формату, а на основі відповіді можна обчислити конкретну модель пристрою.

DoS-атаки із застосуванням BSS (Bluetooth Stack Smasher). В даному методі атаки використовується неправильно сформовані L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) пакети даних для реалізації зависання, вимкнення, перезавантаження пристрою, що атакується.

Влітку 2019 року експерти CISPA (Cyber Intelligence Sharing and Protection Act) та компанії-члени ICASI (Industry Consortium for Advancement of Security on the Internet) – Microsoft, Apple, Intel, Cisco та Amazon скоординовано розкрили інформацію про нову Bluetooth-вразливість, що отримала назву KNOB (Key Negotiation of Bluetooth). Проблема торкається Bluetooth BR/EDR (він же Bluetooth Classic) і дозволяє зловмисникам ефективно скоротити довжину ключа шифрування, що використовується під час з'єднання пристроїв. В результаті зловмисник може здійснювати моніторинг або маніпулювати трафіком, що передаються між двома пристроями.

В грудні 2019 року цими ж експертами знайдено нову проблему в протоколі Bluetooth, що отримала назву BIAS (Bluetooth Impersonation AttackS). Корінь нової проблеми BIAS полягає в тому, як пристрої з підтримкою Bluetooth обробляють ключ зв'язку (link key). Цей ключ генерується, коли два Bluetooth-пристрої вперше з'єднуються. По суті вони “домовляються” про довгостроковий ключ, який будуть використовувати для отримання ключів сесій у майбутньому, щоб не змушувати власників пристроїв щоразу знову проходити тривалий процес з'єднання. Дана вразливість дозволяє зловмиснику видати себе за раніше з'єднаний пристрій, пройти аутентифікацію і підключитися до іншого пристрою, не знаючи ключа зв'язку, який раніше було встановлено між ними.

1 вересня 2019 року дослідники з Сінгапурського університету технологій та дизайну опублікували інформацію про 20 вразливостей, виявлених у поширених bluetooth-чіпах різних виробників, які отримали назву Braktooth. Всі вразливості можна експлуатувати без попередньої авторизації, в більшості випадків досить перебувати неподалік пристрою, який атакується, але необхідно також знати його унікальну адресу (BD\_ADDR). Наслідки – від тимчасового збою в роботі мікросхеми до повного зависання, яке усувається тільки перезавантаженням пристрою. У найскладнішому випадку дослідники реалізували виконання коду, що міститься у прошивці, за довільною адресою.

У 2020 році фахівцями з Федеральної політехнічної школи Лозанни та Університету Пердью було виявлено вразливість під назвою Blurtooth у компоненті стандарту CTKD (Cross-Transport Key Derivation), яка дозволяє зловмисникам перехоплювати ключі аутентифікації. Дана вразливість діє на пристрої, які використовують стандарт Bluetooth з 4.0 до 5.0.

Компонент CTKD використовується для узгодження та налаштування ключів аутентифікації при з'єднанні двох пристроїв. Він працює шляхом налаштування двох різних наборів ключів аутентифікації для стандартів BLE (Bluetooth Low Energy) та BR/EDR (Basic Rate/Enhanced Data Rate). Роль CTKD полягає в тому, щоб підготувати ключі та дозволити пристроям вирішити, яку версію стандарту Bluetooth вони хочуть використовувати. Зловмисники можуть маніпулювати компонентом CTKD, щоб перезаписати ключі аутентифікації Bluetooth на пристрої, та отримати доступ до інших служб та програм з підтримкою Bluetooth на ньому. У деяких версіях атаки Blurtooth ключі аутентифікації повністю перезаписували, а в інших просто змінювали версію для використання слабого шифрування.

У 2019 році дослідники виявили іншу вразливість у Bluetooth-протоколі. З'ясувалося, що спеціалізації BR/EDR дозволяють зламати зашифровані повідомлення через Bluetooth. Для цього зловмиснику потрібно просто зайти до зони покриття пристроїв. Вразливість містилася у можливості Bluetooth-пристроїв самостійно призначати довжину ключа для шифрування інформації.

Одна з головних відмінностей версії Bluetooth 5.0 від попередніх – здатність обробляти вчетверо більше даних за рахунок підвищення швидкості передачі. Вона була збільшена до 2 Мбіт/с, причому дальність для підключення зросла до 200 м

на відкритій місцевості.

Стандарт Bluetooth 5.1 вже має функції, які можна активувати, щоб запобігти атакам Blurtooth. Для інших версій патчів поки немає, а єдиним способом захисту від атак є контроль середовища, в якому з'єднані пристрої.

13 липня 2021 року було прийнято базові спеціалізації технології Bluetooth 5.3, де для захисту з'єднання було поліпшено керування розміром ключа шифрування. Так як Bluetooth BR/EDR розміри ключа шифрування узгоджуються контролерами у підключених пристроях, ця зміна дозволяє хост-пристрою повідомити свого контролера Bluetooth BR/EDR мінімально допустимий розмір ключа за допомогою інтерфейсу хост-контролера (HCI). Це вдосконалення також підвищує ефективність, з якою контролери Bluetooth BR/EDR можуть інформувати хост-пристрій про результати узгодження довжини ключа.

Враховуючи вище викладене, опишемо одні з найголовніших рекомендацій від NIST для профілактики запобігання зламу при використанні з'єднання Bluetooth.

Необхідно встановлювати пристрої Bluetooth на найнижчий і достатній рівень потужності, щоб радіус сигналу залишався в захищеному периметрі. Справа в тому, що встановлення пристроїв Bluetooth з мінімальним необхідним та достатнім рівнем потужності дозволяє забезпечити безпечний доступ авторизованим користувачам.

Не можна використовувати режим з'єднання "Just Works", в якому відсутня безпека та аутентифікація, для пристроїв Bluetooth 2.1 та вище і використовують звичайне захищене з'єднання SSP (Secure Simple Pairing). При створенні пари в режимі "Just Works" немає гарантій захисту від атаки типу «людина всередині» (Man in the middle – MITM).

Необхідно встановлювати PIN-коди, які є досить випадковими, довгими та приватними. Довгі PIN-коди набагато стійкіші до атак за методом "грубої сили" (brute-force).

Пристрої Bluetooth повинні бути налаштовані за замовчуванням, як "не видимі", за винятком випадків, коли це необхідно для з'єднання. У цьому режимі Bluetooth пристрій приховано від інших пристроїв.

Також необхідно використовувати шифрування з'єднання. Без використання шифрування з'єднання відкрито для прослуховування.

Виконуйте з'єднання якомога рідше, в ідеальному випадку в безпечній зоні, де зловмисники не можуть перехопити кадри з обміном ключами



доступу під час з'єднання. У випадку, якщо зловмисник зможе отримати деякі кадри пов'язані з аутентифікацією з'єднання, виникає ризик зламу ключа.

**Висновки.** Використання технології Bluetooth відкриває великі можливості для використання бездротових технологій, але варто

пам'ятати, що поряд з цим відкриваються все більше потенційних загроз як для витоку конфіденційної інформації, так і для зламу та віддаленого доступу до чужого обладнання. Тому для профілактики таких загроз варто дотримуватись рекомендацій NIST щодо використання технології Bluetooth.

#### Список літератури:

1. Matheus E. Garbelini, Sudipta Chattopadhyay, Vaibhav Bedi, Sumei Sun, Ernest Kurniawan (2021), Braktooth: Causing Havoc on Bluetooth Link Manager, URL: <https://asset-group.github.io/disclosures/braktooth/>
2. Key Negotiation of Bluetooth Attack: Breaking Bluetooth Security, URL: <https://knobattack.com/>
3. BlueBorne vulnerabilities impact Amazon Echo and Google Home, URL: <https://www.armis.com/research/blueborne/>

#### **Haryst A.V. BLUETOOTH TECHNOLOGY VULNERABILITY ANALYSIS**

*In the field of telecommunications, Bluetooth technology is the technical and industrial standard for data transmission for personal wireless networks (Wireless personal area network, WPAN). This technology provides a standard, cost-effective, and secure way to exchange information between different devices using a secure, short-range radio frequency. As technology has evolved, cyber threats have also evolved. In the 2010s, the first vulnerabilities in Bluetooth technology were discovered, allowing to gain control over the device.*

*Bluetooth devices surround us everywhere, these are speakers, smart watches, fitness bracelets and headphones. Therefore, the Bluetooth function on the device remains always active. Devices exchange data with each other, loading some part into applications. At the same time, the Bluetooth connection is very vulnerable and can cause the device to be hacked. This allows you to download malware and track not only the location of the owner, but also read personal correspondence, bank card and account data.*

*Bluetooth is useful in everyday life, but is quite vulnerable, like a Wi-Fi connection. Attackers use special applications that help to find active Bluetooth connections nearby. They not only see who is nearby, but they can also track which devices and networks the device has previously connected to. This is serious enough, because the device considers these connections as trusted and connects to them automatically when they are nearby.*

*This article presents the results of the vulnerability analysis of the Bluetooth protocol. Typically, attacks on devices occur in crowded places. Fraudsters calculate the action plan in advance and prepare the device from which they plan to hack. A factory reset tablet or smartphone is suitable for this. The data obtained can be used to blackmail or hack bank accounts. Every year there are more and more available devices, and attackers come up with new ways to hack.*

**Key words:** *Bluetooth-connection, vulnerability, hacking, protocol, authentication, encryption.*

**Семенов А.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Семенова О.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Пінаєв Б.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Куляс Р.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Шпильовий О.О.**

Вінницький національний технічний університет

## **ГНУЧКА ДВОХСМУГОВА LTE АНТЕНА ДЛЯ РАДІОЧАСТОТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ БЕЗДРОТОВИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ І СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

*Сучасні інформаційні технології медичної інженерії стрімко розвиваються. Застосування Інтернету речей та медичних сенсорних мереж, зокрема WBAN (Wireless Body Area Networks), потребує створення нових інфокомунікаційних пристроїв для медичних додатків. Сучасні носимі на руці інфокомунікаційні пристрої в основному є фітнес браслетами та розумними годинниками які є додатками до смартфонів і використовують для обміну інформації WiFi або Bluetooth. На сьогоднішній день виникла актуальна науково-практична задача створення нових носимих інфокомунікаційних пристроїв для застосування в телемедицині. Дана задача є міждисциплінарною. Для її вирішення потрібні знання з інфокомунікаційних і радіо-частотних технологій, а також біомедичної інженерії. Антени є надзвичайно важливим компонентом пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Від якості узгодження параметрів антени в робочому діапазоні частот залежить рівень інформаційних сигналів і енергоефективність інфокомунікаційних пристроїв. Сучасним напрямком приладобудування є створення гнучких антен. Ринок гнучкої електроніки стрімко розширюється. У роботі запропонована нова конструкція гнучкої двохсмугової антени для використання в носимих на руці інфокомунікаційних пристроях. Запропонована гнучка антена є двосторонньою і має габаритні розміри  $39,7 \times 12,0$  мм. Верхня сторона є випромінювальною поверхнею і має геометричні розміри  $27,5 \times 11,0$  мм із мікросмужковою лінією живлення довжиною 12,2 мм і шириною 1,9 мм. Нижня сторона є екранувальною поверхнею і має геометричні розміри  $12,2 \times 12,0$  мм із вирізаною частиною розмірами  $3,5 \times 6,5$  мм для встановлення гнучкої антени на друковану плату. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при носінні на руці діапазон робочих частот гнучкої антени по рівню KCSX не більше 2,1 знаходиться в межах  $881,68$  МГц –  $975,38$  МГц та  $1848,65$  МГц –  $2000$  МГц. Це дозволяє використати запропоновану гнучку антену в діапазонах частот LTE B2 і B8.*

**Ключові слова:** гнучка антена, бездротових, LTE, носимий пристрій, інфокомунікаційна система, телемедицина.

### **Постановка проблеми**

Розвинення інфокомунікаційних мереж 5G із високою швидкістю обміну даних, великою пропускну здатністю та малою затримкою зумовило стрімкий розвиток Інтернету речей (IoT) і сенсорних мереж для широкого кола медичних і немедичних застосувань [1–2]. Сучасні носимі

інфокомунікаційні пристрої, що серійно виготовляються промисловістю, в переважній більшості не є медичними приладами, а є фітнес-браслетами та розумними годинниками [3–4]. Вони мають бездротове з'єднання за допомогою WiFi або Bluetooth зі смартфоном, за допомогою яких здійснюється обмін інформацією. Це обмежує

область їхнього медичного або лікувального застосування, а також для післяопераційного відновлення [1–2]. Сучасні інформаційні технології медичної інженерії стрімко розвиваються. Застосування Інтернету речей та медичних сенсорних мереж, наприклад WBAN (Wireless Body Area Networks), спонукає створення нових інфокомунікаційних пристроїв для медичних додатків.

Анени є надзвичайно важливим компонентом пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних системах [1–5]. Анени в таких системах можуть використовуватися як компонент зв'язку або отримувач енергії [4]. Складний дизайн конструкцій сучасних інфокомунікаційних пристроїв часто вимагають, щоб анени були встановлені на вигнутих і конформних поверхнях [4–5]. При проектуванні носимих інфокомунікаційних пристроїв для медичних застосувань перед розробниками постає низка радіо-конструкторських задач, головною з яких є забезпечення електромагнітної сумісності блоків всередині малого за розмірами корпусу. Задача електромагнітної сумісності блоків носимих інфокомунікаційних пристроїв ускладнюється тим, що в одному корпусі потрібно розташувати від двох до чотирьох антен: 1) LTE/NB-IoT; 2) WiFi; 3) Bluetooth; 4) антену для дистанційного електроживлення (заряджання акумулятора).

Тому розроблення та дослідження нових типів антен для носимих інфокомунікаційних пристроїв є актуальним науково-технічним завданням.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

За останні 3–5 років було опубліковано велику кількість друківаних праць із результатами розроблення та дослідження дизайну антен для радіочастотних технологій доступу носимих пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Це зумовлено тим, що ринок носимих медичних інфокомунікаційних пристроїв стрімко розширюється завдяки значному попиту, що зумовлений глобальними карантинними обмеженнями спричиненими поширеннями хвороби COVID-19. Тому більшість світових і європейських фірм-розробників здійснюють інтенсивні розроблення і дослідження в галузі інфокомунікаційної та радіо-частотної медичної інженерії, через колосальний попит на діагностику небезпечних для життя захворювань.

Сучасним напрямом функціональної електроніки є розроблення гнучких антен [1–7]. Гнучкі анени отримали широке застосування для створення носимих медичних інфокомунікаційних пристроїв [1–7].

У роботі [1] наведено детальний огляд останніх досягнень у методах виготовлення гнучких антен. Гнучкі анени, що використовуються для будь-яких застосувань у мережах бездротових датчиків тіла, на відміну від звичайних чіп-антен або РСВ-антен мають такі особливості: гнучкість, пристосованість, надійність та простоту інтеграції. У роботі [1] представлена експлуатаційна перспектива таких передових підходів як вишиті на тканинах гнучкі анени, інкапсульовані в полімерні композити анени, надруковані за допомогою струменевого друку анени на гнучких ламінатах та тривимірному принтері, а також гнучкі анени, що виготовлені шляхом впорскування рідкого металу в мікроканали. Наведено результати аналізу, переваги та недоліки кожного типу гнучких антен у мікрохвильовому та міліметровому діапазонах хвиль. Також наведено порівняння основних механічних і електричних параметрів гнучких антен для їхнього практичного застосування в медичних датчиках.

У роботі [2] описані дослідження технології антен для медичних імплантатів. У статті [2] узагальнено деякі існуючі методи проектування медичних імплантованих антен та висвітлено різновиди гнучких антен відповідно до медичних телеметричних додатків. Детально розглянуто процес виготовлення антен, описані процедури перевірки антен, включаючи випробування в пробірці та в природньому середовищі. Також у роботі [2] коротко описані системи живлення для антен медичних імплантатів.

У роботі [3] проведено повний аналіз впливу вигину та складання гнучких антен на частотні характеристики їхнього випромінювання, такі як S-параметри, відхилення резонансної частоти та неузгодженість імпедансу з лінією живлення мікросмужкових антен і з гнучкою полімерною підкладкою. Акцент досліджень у роботі [3] спрямований на аналіз впливу вигину на характеристики випромінювання гнучких антен, у яких використовуються полімерні підкладки. Крім того, у роботі [3] наведено результати детального порівняльного аналізу фізичних, електричних, термічних і хімічних властивостей гнучких полімерних матеріалів, які використовувалися як підкладки для створення гнучких антен носимих пристроїв IoT.

У роботі [4] розроблена та досліджена гнучка мікросмужкова антена з геометричними розмірами  $65,55 \times 55,55 \times 1,2$  мм, що надрукована на 3D-принтері на гнучкій підкладці NinjaFlex. Наведені результати досліджень показують, що

така гнучка антена забезпечує дуже хороше узгодження імпедансу на резонансній частоті 2,4 ГГц і максимальне підсилення антени  $-2,78$  дБі, що робить її придатною для таких додатків, як Wi-Fi, WiMAX та мікрохвильовий супутниковий зв'язок.

У роботі [6] представлено три різні конструкції антени для смарт-годинника. Застосовано інтегрування гнучких антен у ремінець годинника. Пропоновані у роботі [6] антени мають діапазон робочих частот від 700 МГц до 2,7 ГГц. У роботі [7] пропонується надширокосмугова гнучка антена-ремінець для пристроїв, які носять на зап'ясті. Гнучка антена побудована на тонкому гнучкому матеріалі з каптону, який легко адаптується до форми зап'ястя. Розроблена в [7] гнучка антена-ремінець працює у всіх європейських та американських діапазонах частот LTE із загальною смугою пропускання від 698 МГц до 2700 МГц при рівні 26 дБ зворотних втрат. Розмір гнучкої антени становить  $127 \times 25 \times 0,13$  мм, вона працює в діапазонах LTE 698–960 МГц, 1710–2170 МГц та 2500–2700 МГц, маючи 78% корисної смуги пропускання нижче 26 дБ зворотних втрат при встановленні на руку людини. Така гнучка антена придатна для виготовлення з використанням гібридної технології друкованих плат з електронними схемами, встановленими на верхній жорсткій секції та асиметричної конічної конструкції антени в гнучких секціях.

Основним недоліком розглянутих гнучких антен є їхні значні геометричні розміри внаслідок чого не зручно вирішувати завдання розроблення дизайну та радіо-конструкторського проектування носимих на руці інфокомунікаційних пристроїв.

### Постановка завдання

Метою роботи є розроблення та дослідження гнучкої антени LTE зі зменшеними геометричними розмірами для застосування в носимих на руці інфокомунікаційних пристроїв діапазонів частот B2 і B8. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) здійснити розроблення конструкції гнучкої антени LTE; 2) виконати комп'ютерне моделювання спрямованих характеристик гнучкої антени LTE; 3) отримати результати експериментальних досліджень хвильових параметрів гнучкої антени LTE.

### Виклад основного матеріалу

На практиці дизайн гнучкої антени та її геометричні підбирають експериментальним шляхом [8] або з використанням сучасних спеціалізованих програм [9–10]. Автори використали пакет програм HFSS ANSYS. За допомогою даного пакету програм можна здійснити синтез гнучкої антени, дослідити її параметри та характеристики, а також досягнути оптимальних параметрів, які б задовольняли поставленим завданням.

На рисунку 1 наведений скріншот робочого вікна програми HFSS ANSYS, що демонструє зовнішній вигляд гнучкої LTE антени та задання параметрів для оптимізації режиму живлення у точці збудження гнучкої антени LTE.

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) був обраний як основний хвильовий параметр гнучкої антени LTE для оптимізації її геометричних розмірів. Графік частотної залежності КСХ гнучкої антени показаний на рис. 2.

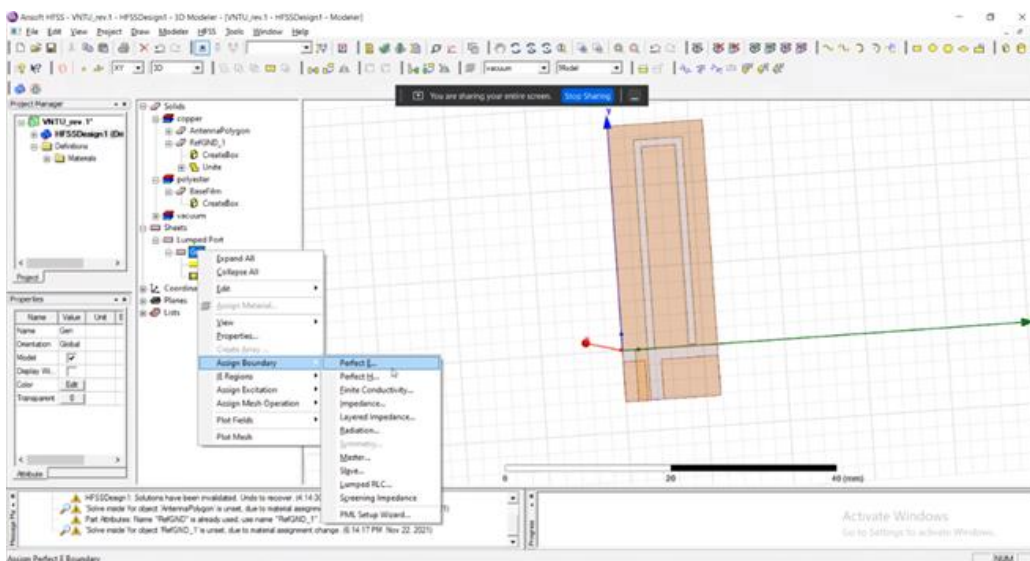


Рис. 1. Зовнішній вигляд гнучкої антени LTE та задання параметрів для оптимізації режиму живлення у точці її збудження

З рисунку 2 випливає, що проєктована гнучка антена є смугова та робоча область її частот зсунута верх по частоті вище ніж В8 верхня частота якого 960 МГц. Також на рисунку 2 спостерігається спадання графіку коефіцієнта стоячої хвилі в області частот вище 1,9 ГГц. У роботі шляхом моделювання було здійснено уточнення геометричних розмірів гнучкої антени для зміщення графіків її частотних характеристик вниз по частоті (рис. 3).

Далі у роботі за допомогою програми HFSS ANSYS було здійснено комп'ютерне моделювання спрямованих властивостей гнучкої антени з уточненими геометричними параметрами. Результати моделювання наведено на рис. 4-5.

По уточнених розмірах гнучкої антени LTE (рис. 6) було створено експериментальний зразок. Як діелектричний матеріал була використана поліетиленова плівка товщиною 30 мкм з відносною діелектричною проникністю 2,03. Формування рисунків металевих поверхонь гнучкої антени було здійснено шляхом використання металеві фольги товщиною 100 мкм. На рис. 7 наведені світлини верхньої (випромінювальної) та нижньої (екранувальної) поверхонь експериментального зразка гнучкої антени LTE.

Дослідження хвильових параметрів гнучкої LTE антени було проведено при її знаходженні у повітрі, а також при розташуванні на бічній поверхні циліндричного тefлонового стакану діаметром основи 60 мм (рис. 8). На рис. 9 наведено результати дослідження гнучкої антени у повітрі в плоскому горизонтальному положенні. Як видно з рис. 9 діапазон робочих частот по рівню КХС не більше 2,1 знаходиться в межах 950,15 МГц – 1000,50 МГц.

Результати експериментальних досліджень гнучкої антени у повітрі (рис. 9) підтверджують спадання графіку КСХ в області високих частот, що було встановлено при

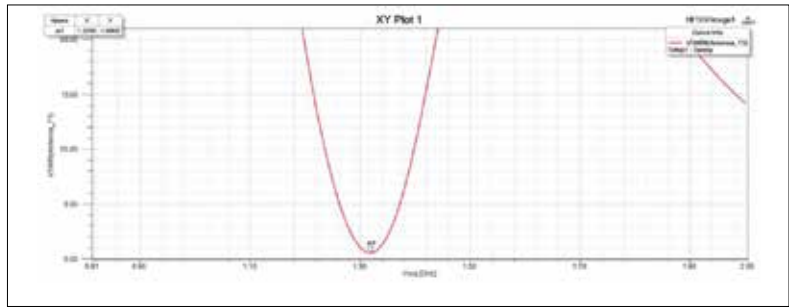


Рис. 2. Графік частотної залежності коефіцієнта стоячої хвилі гнучкої антени LTE

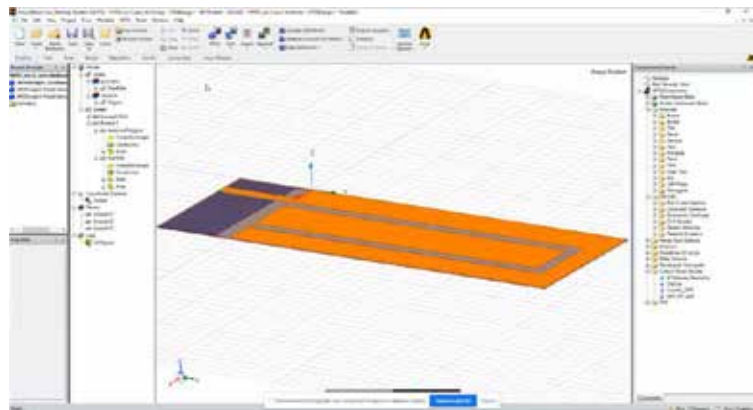
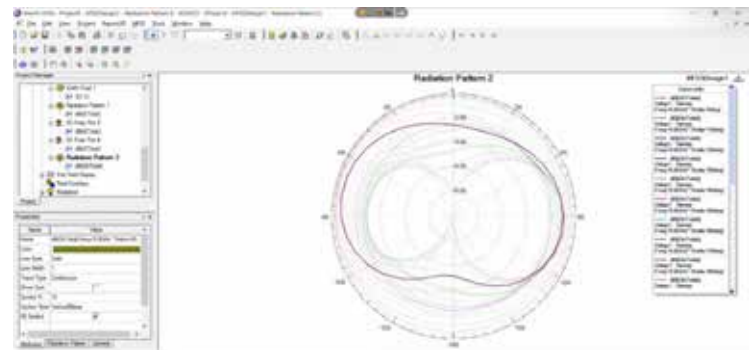
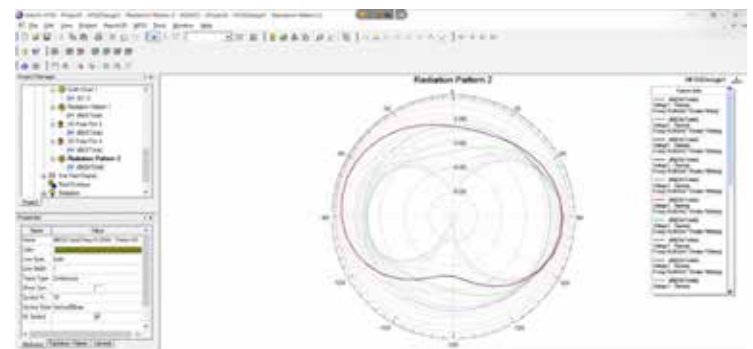


Рис. 3. Уточнення геометричних розмірів гнучкої антени LTE



а



б

Рис. 4. Діаграми спрямованості гнучкої у вертикальній площині (а) та в горизонтальній (б) площині гнучкої антени LTE



Рис. 5. Простора діаграма спрямованості (а) та 3-D зображення просторової діаграми спрямованості (б) гнучкої антени LTE

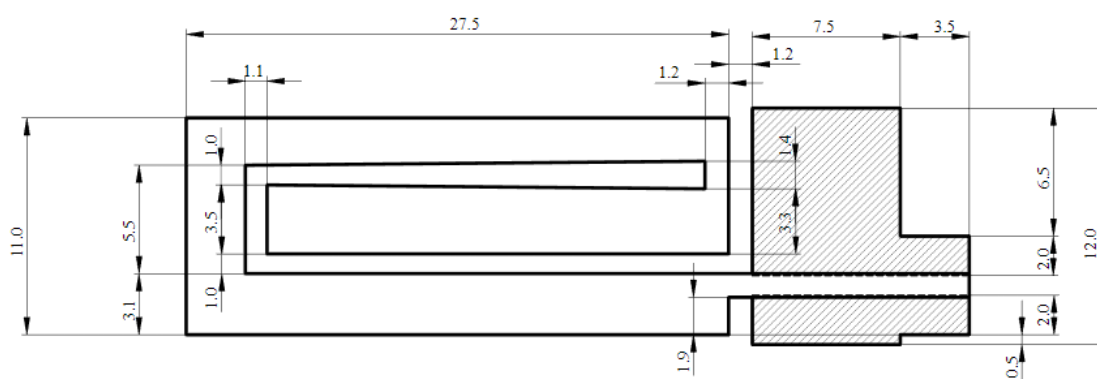


Рис. 6. Креслення гнучкої антени LTE

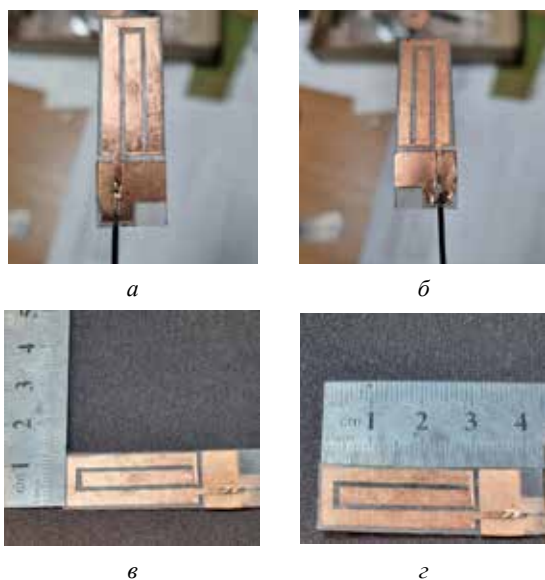


Рис. 7. Фото експериментального зразка гнучкої антени LTE: вигляд зверху (а) і знизу (б), її ширина (в) і довжина (г)



Рис. 8. Фото антени на циліндричному тефлоновому стакані

моделюванні. На рис. 10 наведені суміщені результати експериментального дослідження КСХ гнуч-

кої антени при її розташуванні в повітрі та на бічній стороні тефлонового стакану.

Порівняння результатів експериментального дослідження на рис. 10 показують зсування вниз по частоті графіку КСХ гнучкої антени.

При заповненні тefлонового стакану повітрям і опущеному в стакан по середині вказівного пальця графік КСХ значно зсувається вниз по частоті (рис. 11). Розширюється область робочих частот гнучкої антени LTE і становить 881,68–975,38 МГц. У верхній частині частотного діапазону спостерігається зменшення рівня КСХ до значення 2,9 (рис. 11).

При заповненні тefлонового стакану мінеральною водою графік КСХ ще далі зсувається донизу по частоті (рис. 12). Область робочих частот складає 810,81 МГц – 910,09 МГц. Також у верхній частині частотного діапазону спостерігається значне зменшення рівня КСХ, що дозволяє застосувати цю антену в діапазоні частот 1848,65 МГц – 2000 МГц (рис. 12). Таким чином, в положенні на руці пропонується гнучка антена LTE є дводіапазонною.

**Висновки**

У роботі запропоновано нову конструкцію двох-смугової гнучкої LTE антени для носимих на руці пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Отримано нові результати модельних та експериментальних досліджень гнучкої двох-смугової LTE антени у зігнутому положенні. Оцінений вплив руки людини на хвильові параметри та характеристики гнучкої LTE антени. Области робочих частот гнучкої двох-смугової антени LTE по рівню КСХ не більше 2,1 становлять 881,68–975,38 МГц та 1848,65–2000 МГц. Така антена призначена для застосування в носимих інфокомунікаційних пристроїв діапазонів частот LTE B8 (Uplink 880–915 MHz, Downlink 925–960 MHz) і B2 (Uplink 1850–1910 MHz, Downlink 1930–1990 MHz).

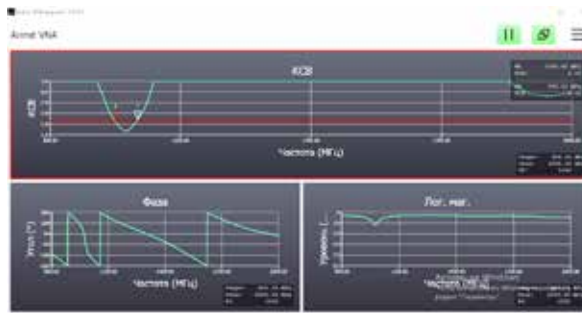


Рис. 9. Результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої у повітрі

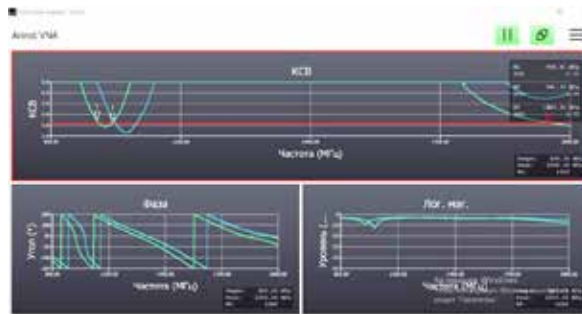


Рис. 10. Суміщені результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої антени при її розташуванні у повітрі (синя лінія) та на тefлоновому стакані (зелена лінія)

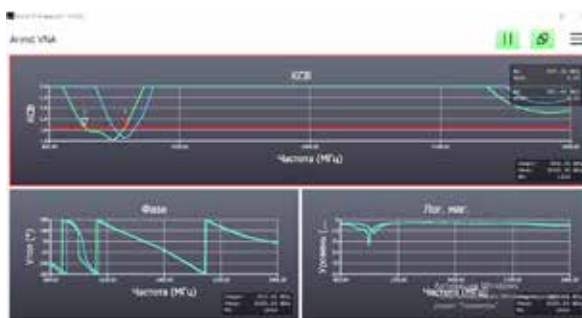


Рис. 11. Суміщені результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої антени при опущеному вказівного пальця в тefлоновий стакан по середині (зелена лінія) і гнучкої антени в повітрі (синя лінія)

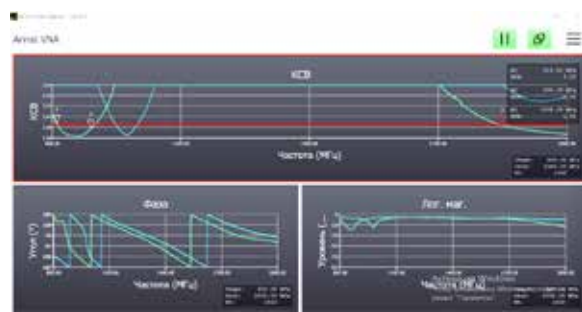


Рис. 12. Суміщені результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої антени при заповненні тefлонового стакану мінеральною водою (зелена лінія) і гнучкої антени в повітрі (синя лінія)

Список літератури:

1. Bahare Mohamadzade, Raheel M. Hashmi, Roy B. V. B. Simorangkir, Reza Gharaei, Sabih Ur Rehman, Qammer H. Abbasi. Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art. *Sensors*, vol. 19, no. 10. MDPI AG, p. 2312, May 19, 2019. DOI: 10.3390/s19102312.
2. Md Mohiuddin Soliman, Muhammad E. H. Chowdhury, Amith Khandakar, Mohammad Tariqul Islam, Yazan Qiblawey, Farayi Musharavati, Erfan Zal Nezhad. Review on Medical Implantable Antenna Technology and Imminent Research Challenges. *Sensors*, vol. 21, no. 9, MDPI AG, p. 3163, May 02, 2021. DOI: 10.3390/s21093163.
3. M. U. Ali Khan, R. Raad, F. Tubbal, P. I. Theoharis, S. Liu, J. Foroughi. Bending Analysis of Polymer-Based Flexible Antennas for Wearable, General IoT Applications: A Review. *Polymers*, vol. 13, no. 3, MDPI AG, p. 357, Jan. 22, 2021. DOI: 10.3390/polym13030357.
4. Dipankar Mitra, Sayan Roy, Ryan Striker, Ellie Burczek, Ahsan Aqueeb, Henry Wolf, Kazi Sadman Kabir, Shengrong Ye, Benjamin D. Braaten. Conductive Electrified and Nonconductive NinjaFlex Filaments based Flexible Microstrip Antenna for Changing Conformal Surface Applications. *Electronics*, vol. 10, no. 7, MDPI AG, p. 821, Mar. 30, 2021. DOI: 10.3390/electronics10070821.
5. Sharadindu Gopal Kirtania, Alan Wesley Elger, Md. Rabiul Hasan, Anna Wisniewska, Karthik Sekhar, Tutku Karacolak and Praveen Kumar Sekhar. Flexible Antennas: A Review. *Micromachines*, vol. 11, no. 9, MDPI AG, p. 847, Sep. 11, 2020. DOI: 10.3390/mi11090847.
6. Zhao K., Ying Z., He S. Antenna designs of smart watch for cellular communications by using metal belt. *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, Portugal, 13–17 April 2015, pp. 1–5.
7. Flores-Cuadras J. R., Medina-Monroy J. L., Chavez-Perez R. A., Lobato-Morales, H. Novel ultra-wide-band flexible antenna for wearable wrist worn devices with 4G LTE communications. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 59, Issue 4, 2017, pp. 777–783. DOI: 10.1002/mop.30393.
8. Semenov A., Pastushenko A., Semenova O., Koval K. Flexible antenna for lte-m1 wearables. *Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems: Proceedings of IXth International Scientific-Practical Conference*. Chernivtsi : «Ruta», 2021, pp. 49–50.
9. Семенов А.О., Семенова О.О., Коваль К.О., Пастушенко О.Л. Гнучка LTE антена для носимих інфокомунікаційних пристроїв. *8-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПІРН – 2021)*, 03–05 листопада 2021, Вінниця : ВНТУ. С. 1–3. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/34780>
10. Семенов А.О., Іванов О.С., Шмата В.С. LTE широкопasmовою антена для радіотехнологій доступу інфокомунікаційних пристроїв. *8-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПІРН – 2021)*, 0305 листопада 2021, Вінниця : ВНТУ. С. 1–3. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/view/13911/11780>

**Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Kulas R.O., Shpylovyi O.O. FLEXIBLE TWO-BAND LTE ANTENNA FOR RADIO-FREQUENCY ACCESS TECHNOLOGIES FOR WEARABLE DEVICES OF WIRELESS INFO-COMMUNICATION AND SENSOR NETWORKS**

Modern information technologies of medical engineering are developing rapidly. The use of the Internet of Things and medical sensor networks, in particular WBAN (Wireless Body Area Networks), requires the creation of new infocommunication devices for medical applications. Modern wearable infocommunication devices are mainly fitness bracelets and smart watches, which are applications for smartphones and use WiFi or Bluetooth to exchange information. To date, an urgent scientific and practical task has arisen to create new wearable infocommunication devices for use in telemedicine. This task is interdisciplinary. Its solution requires knowledge of infocommunication and radio frequency technologies, as well as biomedical engineering. Antennas are an essential component of wireless infocommunication and sensor networks. The level of information signals and the energy efficiency of infocommunication devices depend on the quality of matching the antenna parameters in the operating frequency range. The modern direction of instrumentation is the creation of flexible antennas. The market for flexible electronics is expanding rapidly. The paper proposes a new design of a flexible two-band antenna for use in hand-held infocommunication devices. The proposed flexible antenna is double-sided and has overall dimensions of 39.7×12.0 mm. The upper side is a radiating surface and has geometric dimensions of 27.5×11.0 mm with a microstrip power line 12.2 mm long and 1.9 mm wide. The lower side is a shielding surface and has geometric dimensions of 12.2×12.0 mm with a cut-out part measuring 3.5×6.5 mm for installing a flexible antenna on a printed circuit board. As a result of experimental studies, it was found that when worn on the arm, the operating frequency range of the flexible antenna in terms of SWR is not more than 2.1 is within 810.81 MHz – 975.38 MHz and 1848.65 MHz – 2000 MHz. This allows the proposed flexible antenna to be used in the LTE B2 and B8 frequency bands.

**Key words:** flexible antenna, wireless, LTE, wearable device, infocommunication system, telemedicine.



# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 62-533.66

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/08>**Батюк С.Г.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лядишев Д.К.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Імітаційне моделювання динамічних систем – актуальний напрямок і ефективний інструментарій програмного моделювання динаміки з використанням як універсальних, так і спеціалізованих програмних продуктів. Імітаційне моделювання технологій, агрегатів, виробництв і кібер-фізичних систем – це програмне (віртуальне) моделювання фізичних (реальних) активів. Імітаційне моделювання автоматизованого технологічного комплексу – це програмно-технічне моделювання контролерної і супервізорної функціональності автоматизованої системи управління з використанням програмних (не фізичних і не математичних) моделей (цифрових двійників) технологічного об'єкту управління. Функціональне імітаційне моделювання динамічної системи – імітаційне моделювання функцій динамічної системи. Структурне імітаційне моделювання динамічної системи – моделювання взаємодії структурних частин динамічної системи.

На кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів Київського Політехнічного Інституту розроблюються полігони імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів теплоенергетичних режимних параметрів. Програмно-модельним інструментарієм розробки полігону імітаційного SIL-моделювання автоматизованого технологічного комплексу є: 1) альбом моделей «Моделювання елементів і структур промислових систем автоматичного регулювання в Matlab Simulink» для імітаційного функціонального моделювання систем автоматичного регулювання; 2) програмно-технічний SIL-симулятор автоматизованих технологічних комплексів на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio для імітаційного структурного моделювання автоматизованих технологічних комплексів.

Розроблений програмно-технічний SIL-симулятор є ефективним програмно-модельним інструментарієм розробки полігонів імітаційного SIL-моделювання автоматизованих технологічних комплексів. Розроблені полігони імітаційного SIL-моделювання автоматизованих технологічних комплексів можуть бути використані як в навчальному процесі (основне призначення), так і техно-робочому проектуванні чи модернізації автоматизованих технологічних комплексів (опція). Ідеологія імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів може бути реалізована для будь-якого автоматизованого технологічного комплексу, а також в MES-системах на зовсім іншій програмно-технічній платформі.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, полігон імітаційного моделювання, програмно-технічний симулятор, імітаційне функціональне моделювання, імітаційне структурне моделювання, SIL-моделювання, HIL-моделювання, цифрові двійники, цифрові близнюки, CAP режимного параметру, автоматизований технологічний комплекс.

**Постановка проблеми.** Імітаційне моделювання динамічних систем – актуальний напрямок і ефективний інструментарій програмного моделювання динаміки з використанням як універ-

сальних, так і спеціалізованих програмних продуктів [1]. Для промислової автоматизації значний практичний інтерес має імітаційне моделювання динамічних систем в системах автоматизованого

управління технологічними процесами промислових технологічних агрегатів, в тому числі теплоенергетичних агрегатів.

Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – це технологічний агрегат, який автоматизується. Структурно ТОУ складається з окремих об'єктів управління (ОУ) – каналів передачі дії «регульовальна дія – регульований параметр». Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП; надалі просто АСУ) ТОУ є дворівневими. Програмно-технічною платформою контролерного (нижнього) рівня АСУ є програмовані логічні контролери (ПЛК). Бізнес-логіка (неперервне регулювання і програмно-логічне управління) в ПЛК реалізується функціональними блоками (ФБ). Програмно-технічною платформою супервізорного (верхнього) рівня АСУ є HMI/SCADA-системи (надалі системи ЛМІ – людинно-машинного інтерфейсу). Візуалізація в ЛМІ реалізується графічними вікнами з вставленими і анімованими графічними елементами і контролами (меню, мнемосхеми, аларми, тренди, рецепти, розклади, звіти тощо). Оператор технологічного процесу (ОТП) через ЛМІ реалізує автоматизоване (за участі людини) управління технологічними процесами ТОУ. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – це ТОУ з АСУ, якою ОТП управляє цим ТОУ. АТК – це сукупність систем автоматичного регулювання (САР). Автоматична система регулювання (АСР) – це сукупність програмно-технічних засобів (сенсори; засоби візуалізації; регулятори; актуатори) в складі САР. АСУ – це сукупність АСР. САР – це ОУ (як канал передачі дії) з АСР, яка управляє цим ОУ. САУ – система автоматичного управління, яка об'єднує декілька функціонально взаємодіючих САР. Сучасна АСУ функціонально структурується на дві підсистеми: інформаційно-вимірювальну

систему (ІВС) і регульовально-виконавчу систему (РВС). ІВС – це сукупність вимірювальних каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори або давачі Д; реєструючі прилади РП; вхідні модулі – аналогово-цифрові перетворювачі АЦП – ПЛК). РВС – це сукупність регульовально-виконавчих каналів (РВК) технологічних параметрів (ФБ в ПЛК; вихідні модулі – цифро-аналогові перетворювачі ЦАП – ПЛК; актуатори або виконавчі механізми ВМ; блоки ручного управління БРУ для вибору режимів автоматичного (від ПЛК) або ручного і дистанційного управління з пульта оператора ВМ в ручному режимі; регулюючі органи РО). Програмно-технічні засоби (ПТЗ) АСР – це сукупність ВК і РВК в складі АСР (коректно буде також сказати – в складі САР).

На рисунку 1 представлена схема структурна сучасної ПТЗ типової каскадної САР (на конкретному прикладі). Схема демонструє: 1) вимірювання параметрів давачами Д1 і Д2 і вхідними АЦП ПЛК (регульований параметр – температура зворотної води; параметр з проміжної точки – температура прямої води); 2) первинну обробку виміряних сигналів в ПЛК (ФБ на схемі не вказані); 3) каскадне регулювання в ПЛК (ФБ коригуючого регулятора температури зворотної води змінює завдання ФБ стабілізуючого регулятора температури прямої води); 4) видачу управляючого сигналу з ПЛК через вихідний ЦАП і БРУ на ВМ, який реалізує регульовальну дію – переміщення РО на подачі води в гріючий контур теплообмінника; 5) вторинну обробку виміряних даних в ЛМІ (обмін даними ПЛК-ЛМІ за протоколом OPC-UA; ЛМІ SQL-запитами записує історичні дані в SQL-СУБД; ЛМІ, як MQTT-публікатор (паблішер) передає файл даних на MQTT-брокер, де він зчитується MQTT-підписувачем (сабскрайбером)).

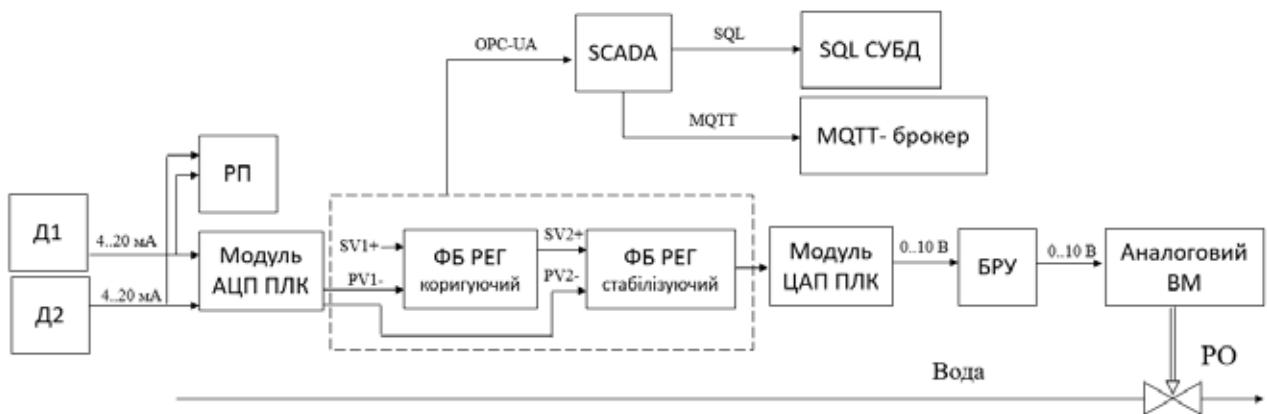


Рис. 1. Схема структурна ПТЗ каскадної САР температури зворотної води в незалежній системі центрального опалення. Регульовальна дія – зміна витрати води в гріючому контурі теплообмінника

Задачами імітаційного моделювання ПТЗ промислових САР є моделювання окремих функцій ПТЗ і моделювання взаємодії структурних компонентів ПТЗ (БК і РБК) з спільним використанням сучасного програмно-технічного інструментарію АСУ і систем комп'ютерного моделювання [2].

**Аналіз проблеми.** Моделювання об'єктів – це маніпулювання аналогами реальних об'єктів замість маніпулювання реальними об'єктами. Аналоги об'єктів можуть бути спрощеними, адекватними або складнішими порівняно з реальними об'єктами.

#### Різновиди моделювання динамічних систем

- Фізичне моделювання (фізичні аналоги фізичних об'єктів). Математичні засоби: теорія подібності, теорема Бекінгема (пі-теорема або теорема розмірностей), критерії (інваріанти) подібності. Застосування: авіація; космонавтика; теплоенергетика і ядерна енергетика; військова промисловість.

- Аналітичне моделювання (математичні аналоги динамічних систем). Математичні засоби: лінійні і нелінійні диференційні рівняння. Застосування: динамічні системи в промисловості і в енергетиці.

- Програмне (імітаційне) моделювання (обчислювальні аналоги динамічних систем). Математичні засоби: передавальні функції, функціональні блоки, системи комп'ютерної математики (СКМ), блок-діаграми (MatLab Simulink), програмно-технологічні компоненти (MatLab SimScape). Застосування: динамічні системи в промисловості і в енергетиці.

Імітаційне моделювання технологій, агрегатів, виробництв і кібер-фізичних систем – це програмне (віртуальне) моделювання фізичних (реальних) активів. Вирізняють симуляцію і емуляцію. Симуляція – це імітаційне моделювання фізичного активу, яке імітує як структуру і динаміку фізичного активу, так і збурення (технологічні і параметричні) на фізичний актив. Емуляція – це імітаційне моделювання фізичного активу, яке імітує структуру і динаміку фізичного активу, але використовує для симуляції реальні (виміряні) збурення (технологічні і параметричні) на фізичний актив. Емулятор – це симулятор, зв'язаний з фізичним активом через реальні (які вимірюються в реальному часі) технологічні і параметричні збурення на фізичний актив.

Імітаційне моделювання АТК – це програмно-технічне моделювання контролерної і супервізорної функціональності АСУ з використанням програмних (не фізичних і не математичних) моделей

(цифрових двійників) ТОУ. Функціональне імітаційне моделювання динамічної системи – імітаційне моделювання функцій динамічної системи. Структурне імітаційне моделювання динамічної системи – моделювання взаємодії структурних частин динамічної системи.

Імітаційне моделювання АТК є ефективним інструментарієм для перевірки роботоздатності і налагодження АСУ за відсутності доступу до реального фізичного ТОУ і неможливості розрахунку динаміки систем автоматичного регулювання з використанням складних математичних моделей ТОУ. Імітаційне моделювання АТК використовується на стадіях проектування (розробки і програмування), впровадження, тиражування і модернізації АСУ.

ТОУ моделюється або в СКМ, або прямо в самому ПЛК. Реалізація ЛМІ – зовнішня SCADA-система або НМІ-панель самого ПЛК. Реалізація ПЛК – хардПЛК (реальний фізичний ПЛК) або софтПЛК (програмно реалізований в комп'ютері ПЛК).

Вирізняють: імітаційне SIL-моделювання АТК (Software-In-the-Loop: софтПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована в СКМ; ЛМІ – зовнішня SCADA-система); імітаційне HIL-моделювання АТК (Hardware-In-the-Loop: хардПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована прямо в хардПЛК; ЛМІ – НМІ-панель самого хардПЛК); імітаційне VIL-моделювання АТК (Viewer-In-the-Loop: модель ТОУ, ПЛК і ЛМІ реалізовані в НМІ/SCADA-системі).

Цифровий твінінг – це розробка і впровадження цифрових двійників. Цифровий двійник (Digital Twin – DT) – керована реальними виміряними даними цифрова копія фізичного активу для оптимізації активу в реальному часі впродовж всього циклу життя активу. Цифровий двійник реалізує патерн проектування M-V-C (Model-View-Controller – Модель-Візуалізація-Контролінг).

З позицій імітаційного моделювання, цифровий двійник – це емулятор фізичного активу, тобто симулятор фізичного активу, зв'язаний з цим фізичним активом через реальні (тобто вимірювані в реальному часі) технологічні і параметричні збурення на цей фізичний актив.

DT-прототип (DT-Prototype) – програмна модель фізичного активу без підключення до реальних вимірянних даних (тобто симулятор фізичного активу). DT-екземпляр (DT-Instance) – програмна модель фізичного активу з підключенням до реальних вимірянних даних (тобто емулятор фізичного

активу). DT-агрегатор (DT-Aggregate) – сукупність програмних моделей фізичних активів з підключенням до реальних вимірних даних і обміном даними між моделями (тобто емулятор комплексу фізичних активів). DT-продукт (DT-Product) – цифровий двійник окремого продукту. DT-процес (DT-Process) – цифровий двійник технологічного процесу. DT-система (DT-System) – цифровий двійник складної системи з продуктів і процесів. DT-колекція (DT-Collection) – колекція цифрових двійників. DT-середовище (DT-Environment) – фізичне середовище, з яким взаємодіють цифрові двійники (ПЛК для обміну даними тощо).

Екземпляри ЦД ТОУ (емюлятори ТОУ) має сенс використовувати в АСТД – автоматизованих системах технічної діагностики – для задач предиктивного обслуговування (predictive maintenance) технологічного обладнання на основі інформації від кількісних давачів (термометри, п'єзометри, витратоміри, рівнеміри, концентратоміри, контроль руху) і якісних давачів (спектрометрія, якісний аналіз тощо). Особливість: режим порадики; відсутність замкнених контурів регулювання режимних параметрів. Не має сенсу використовувати в імітаційних моделях ATK для тестування АСУ.

Прототипи ЦД ТОУ (симулятори ТОУ або просто імітаційні моделі ТОУ) має сенс використовувати в імітаційних моделях ATK. Мета – налагодження і тестування АСУ (на стадіях техно-робочого проектування, введення в дію, тиражування, модернізації). Особливість: замкнені контури регулювання режимних параметрів; одноконтурні і каскадні САР; взаємовпливи між САР через збурення зі сторони регулюючого органу і за навантаженням (а не тільки просто моделювання автономних САР). Не має сенсу використовувати в АСТД для задач предиктивного обслуговування (predictive maintenance).

**Постановка завдання.** На кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів (АТЕП) КПІ розроблюються полігони імітаційного моделювання ATK теплоенергетичних режимних параметрів. Полігони використовуються в навчальному процесі і входять до складу лабораторії імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів (ІМ ATK). Лабораторний комплекс ІМ ATK призначений для імітаційного моделювання теплоенергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем). В лабораторії виконуються лабораторні роботи з автоматизації технологічних процесів, програмування контролерної і супервізорної функціональності АСУ. Лабораторія використовується для дослідження і розробки АСУ

в енергетиці і промисловості в процесі роботи над курсовими проектами, дипломними проектами бакалавра, магістерськими дисертаціями.

На рисунку 2 представлені структури полігонів імітаційного моделювання ATK в лабораторії ІМ ATK.

Полігон імітаційного SIL-моделювання ATK ТОУ призначений для: 1) використання в навчальному процесі кафедри АТЕП (наскрізна віртуальна комплексна лабораторна робота з дисциплін «Інформаційно-вимірювальні системи» (2 курс), «Автоматизовані системи управління» (3 курс), «Супервізорні засоби автоматизації» (4 курс)); 2) використання в якості програмно-технічного симулятора при проектуванні, модернізації і тиражуванні промислових АСУТП ТОУ.

Програмно-модельним інструментарієм розробки полігону імітаційного SIL-моделювання ATK ТОУ є: 1) альбом моделей «Моделювання елементів і структур промислових САР в СКМ Matlab Simulink» для імітаційного функціонального моделювання САР промислових систем; 2) програмно-технічний SIL-симулятор ATK на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio для імітаційного структурного моделювання ATK ТОУ.

Задачами розробки полігону імітаційного SIL-моделювання ATK ТОУ є: 1) зробити огляд ATK ТОУ; 2) виконати інженерний розрахунок САР режимного параметру; 3) виконати функціональне моделювання САР режимного параметру в СКМ Matlab Simulink; 4) виконати структурне моделювання САР режимного параметру в програмно-технічному SIL-симуляторі на платформі Simulink/CoDeSys/WebStudio; 5) розробити посібник «Полігон імітаційного SIL-моделювання ATK ТОУ» (порядок роботи з полігоном імітаційного SIL-моделювання ATK ТОУ).

Інженерний розрахунок АСУТП – це спрощений (арифметичні дії) і комплексний (метрологічний розрахунок; розрахунок надійності; вибір РО; розрахунок і функціональне моделювання динаміки) швидкий формульний розрахунок основних показників робоздатності САР в складі АСУТП, на основі якого приймаються рішення щодо експлуатації САР.

Склад полігону імітаційного SIL-моделювання ATK ТОУ: 1) посібник «Полігон імітаційного SIL-моделювання ATK ТОУ» з результатами розрахунків, імітаційного функціонального і структурного моделювання САР режимного параметру; 2) файл проекту функціонального моделювання САР режимного параметру в СКМ Matlab Simulink;

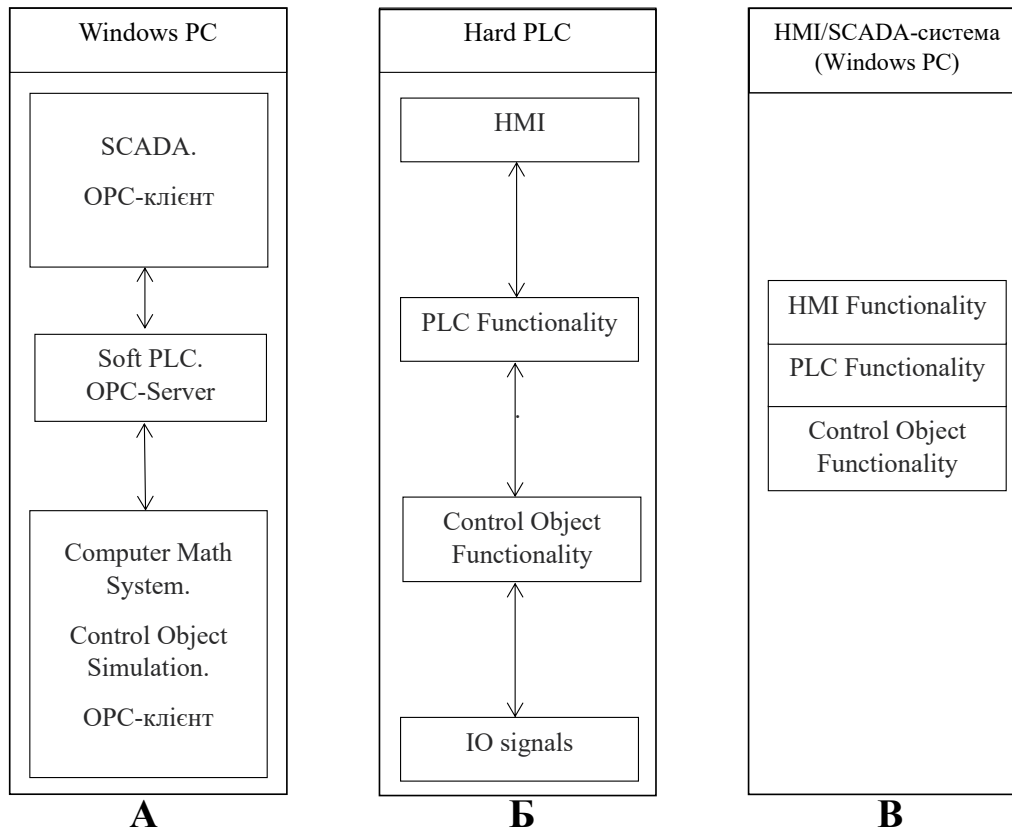


Рис. 2. Структури полігонів імітаційного моделювання АТК

- А) Структура полігону імітаційного SIL-моделювання АТК.  
 Б) Структура полігону імітаційного HIL-моделювання АТК.  
 В) Структура полігону імітаційного VIL-моделювання АТК.

3) сконфігурований програмно-технічний SIL-симулятор – папка проекту WebStudio з структурним моделюванням HMI/SCADA-функціональності САР режимного параметру.

**Результати моделювання.** Полігони імітаційного SIL-моделювання реалізують як функціональне, так і структурне імітаційне моделювання АТК ТОУ, що дає можливість користувачу всебічно дослідити ТОУ і АТК, який розроблюється. Полігони підтримують імітаційне моделювання ВК ІВС АСУ і РВК РВС АСУ.

Функціональні моделі імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ (альбом моделей «Моделювання елементів і структур промислових САР в СКМ Matlab Simulink»)

- Моделі елементарних промислових ТОУ.
- Моделі фільтрів низької частоти, високої частоти і смугових.
- Модель зовнішньої і внутрішньої фільтрації сигналів і даних в теплоенергетичних САР.
- Модель аналогового ПІ-регулятора з виконавчим механізмом змінної швидкості (позиціонером).

- Модель релейно-імпульсного ДПІ-регулятора з виконавчим механізмом постійної швидкості (інтегратором); в комплекті – ПІ-закон регулювання.

- Модель нелінійного РО (квадратична нелінійність).

- Модель одноконтурної САР з ПІ-регулятором.

- Модель (одноконтурної) релейної САР з двопозиційним (релейним) регулятором.

- Модель комбінованої САР.

- Модель двоконтурної двовимпульсної САР.

- Модель двоконтурної каскадної САР.

- Модель двомірної системи зв'язаного регулювання.

- Модель структурно несталого САР.

- Модель САУ промислової топки: САР температури топки; САР пропорціонування витрати повітря; САР розрідження в топці.

- Модель САР тиску в колекторі.

- Модель САР каскадного басейну.

- Модель САУ газомазутового барабанного енергетичного парового котла з моделюванням

ефекту набрякання рівня пароводяної суміші в барабані: САР теплового навантаження (САР тиску в паропроводі турбіни); одноконтурна САР рівня в барабані котла з триімпульсним регулятором. Функціональне і структурне моделювання САУ представлено відповідно в роботах авторів [3] і [4].

- Моделі одноконтурних САР з структурними регуляторами. Предиктивний регулятор. Каскадний регулятор. Квадратичний регулятор.

Структурні моделі імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ (програмно-технічний SIL-симулятор АТК на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio)

На рисунку 3 представлений програмний компонент софтверного ПЛК CoDeSys для моделювання функцій первинної обробки сигналів в ПЛК. Програмний компонент підтримується вікном візуалізації в софтверному ПЛК CoDeSys з елементами управління і багатоточковим трендом. Програмний компонент дозволяє змоделювати в реальному часі типову контролерну функціональність ВК ІВС АСУ.

На рисунку 4 представлена модель універсального ТОУ в СКМ Matlab Simulink. Модель працює в реальному часі, тобто в темпі з реальним перехідним процесом. Обмін даними з софтверним ПЛК CoDeSys – за протоколом OPC-DA. Універсальність ТОУ полягає в наступному: 1) має швид-

кісну та інерційну частини з можливістю вимірювання сигналу з проміжної точки ОУ, що дає можливість використати ТОУ як в одноконтурній САР, так і в каскадній сар; 2) дозволяє реалізувати в реальному часі сигнальні збурення зміною завдання і зі сторони РО і параметричні збурення зміною параметрів ОУ; 3) дозволяє змоделювати низькочастотну і високочастотну зовнішні перешкоди для реалізації фільтрації вимірних даних в ПЛК.

На рисунку 5 представлений програмний компонент софтверного ПЛК CoDeSys для реалізації універсальної каскадної АСР в ПЛК. Програмний компонент підтримується вікном візуалізації в софтверному ПЛК CoDeSys з елементами управління і багатоточковим трендом. Обмін даними з ТОУ в СКМ Matlab Simulink – за протоколом OPC-DA. Програмний компонент дозволяє змоделювати в реальному часі типову контролерну функціональність каскадної САР. В промисловості практично використовуються тільки дві САР – одноконтурна і каскадна. Решта типів САР практично не використовуються, так як для реалізації своїх внутрішніх і зовнішніх компенсаторів потребують ланок реального диференціювання, які практично неможливо реалізувати в ПЛК. (Використовується релейна САР для тих ОУ, де реалізація САР з ПІ-регуляторами є занадто коштовною, наприклад в багатозонних – до 20 зон регулю-

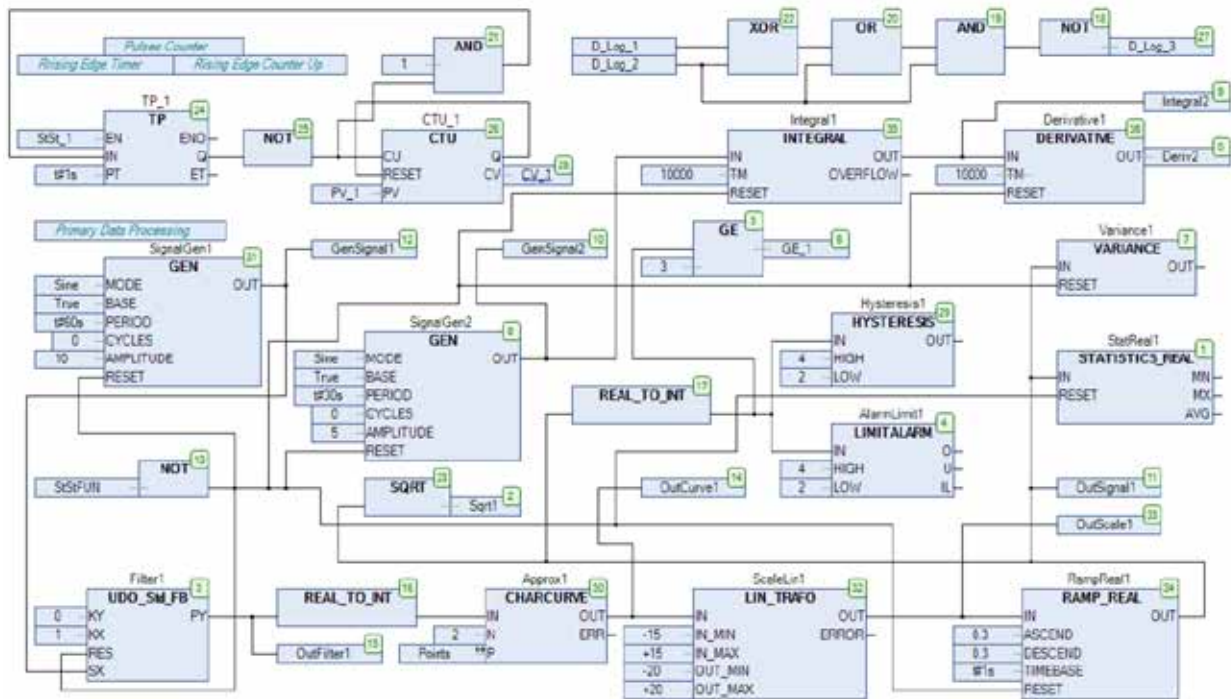


Рис. 3. Скріншот програмного компонента софтверного ПЛК CoDeSys для моделювання функцій первинної обробки сигналів в ПЛК

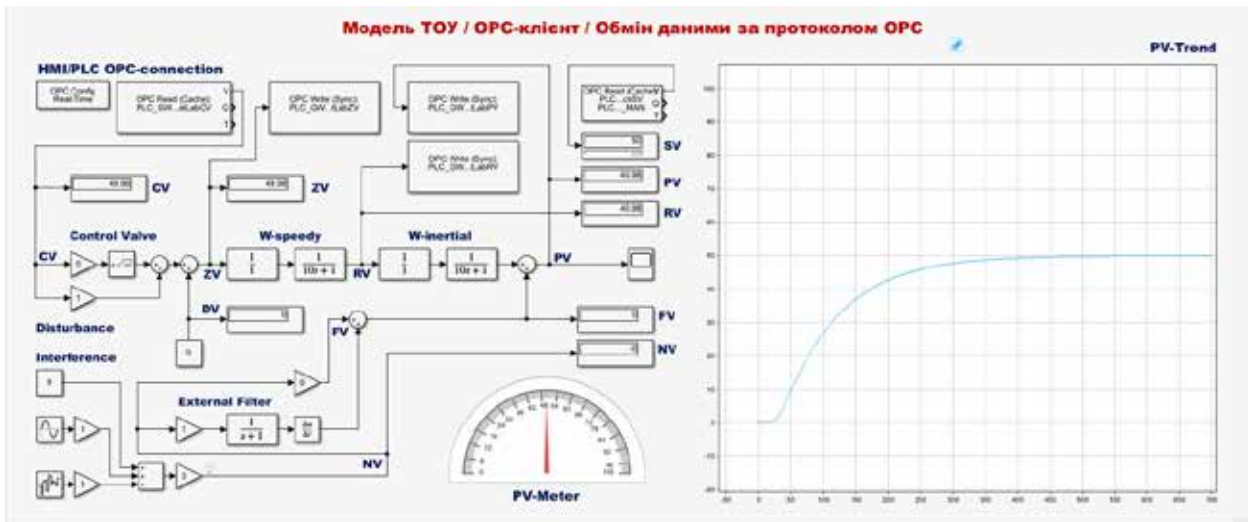


Рис. 4. Скріншот моделі універсального ТОУ в СКМ Matlab Simulink

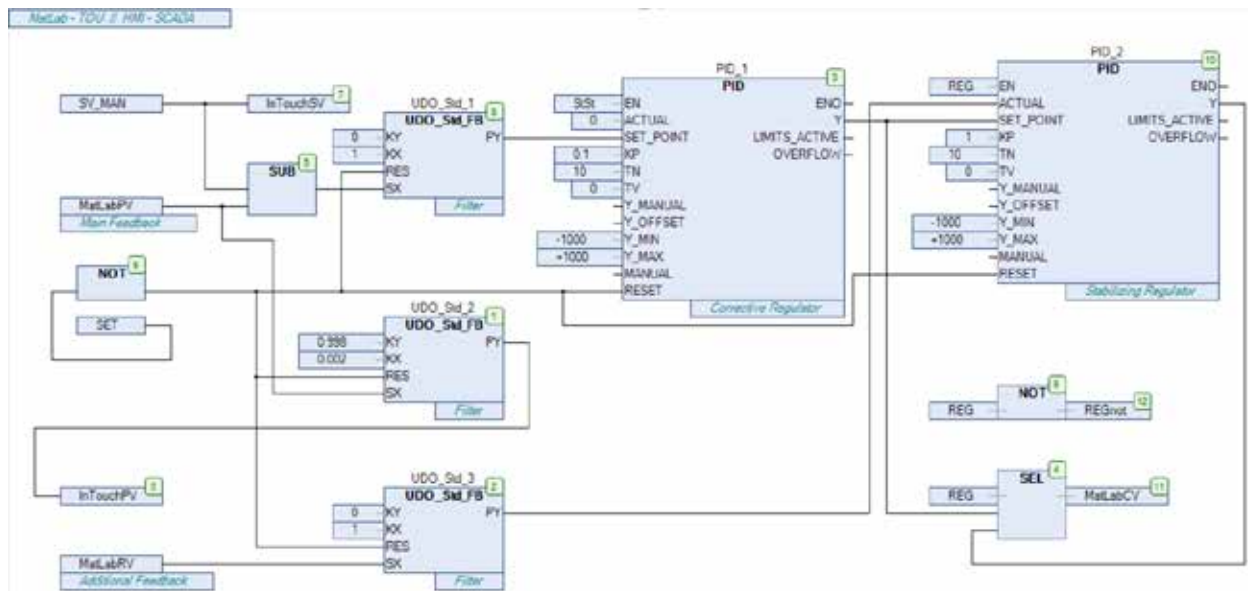


Рис. 5. Скріншот універсальної каскадної АСР в софтПЛК CoDeSys

вання температури – тунельних печак для випалення цегли.) Каскадна САР принципово суттєво краща за одноконтурну САР при збуренні зі сторони РО. При збуренні зміною завдання одноконтурна і каскадна САР забезпечують практично однакові перехідні процеси. Каскадна САР може бути реалізована тільки тоді, коли є можливість виміряти параметр з проміжної точки ОУ, тому каскадна САР – найкращий представник САР з додатковими інформаційними каналами (додатковими зворотними зв'язками). Універсальність каскадної АСР полягає в тому, що вона може бути легко трансформована в одноконтурну АСР – відключається стабілізуючий регулятор і коригую-

чий регулятор каскадної АСР стає регулятором одноконтурної АСР.

На рисунку 6 представлено вікно «Models» ЛМІ WebStudio. Вікно підтримує візуалізацію взаємодії універсального ТОУ в СКМ Matlab Simulink і універсальної АСР в софтПЛК CoDeSys. Іншими словами, вікно візуалізує перехідний процес в універсальній каскадній САР. Обмін даними з софтПЛК CoDeSys – за протоколом OPC-DA. Моделювання будь-якої САР як каскадної САР має сенс, так як каскадна САР може бути легко трансформована в одноконтурну САР шляхом трансформації каскадної АСР в софтПЛК CoDeSys в одноконтурну АСР.

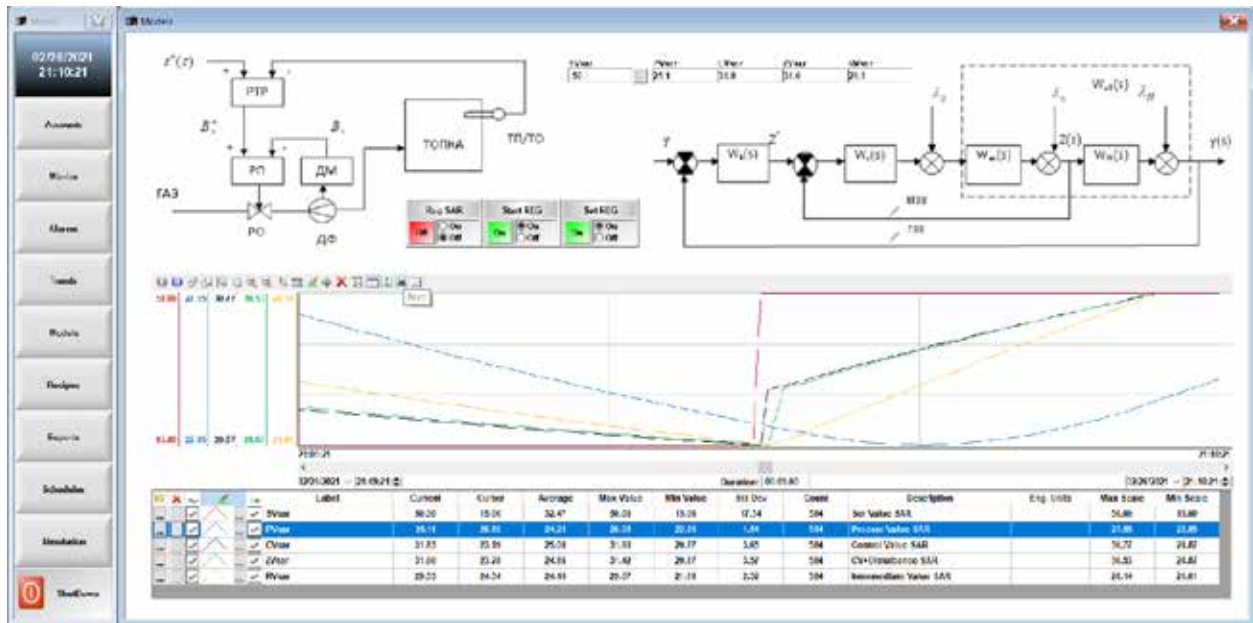


Рис.6. Скріншот вікна «Models» візуалізації каскадної САР в ЛМІ WebStudio

В структурному моделюванні немає сенсу моделювати взаємодію САР, як це зроблено в функціональному моделюванні САУ промислової топки і САУ газомазуткового барабанного енергетичного парового котла. Причина – всі промислові САР є автономними, тобто мають працювати як автономні САР режимних параметрів незалежно від інших САР. Вплив іншої САР на роботу автономної САР – це збурення, яке потрібно парирувати; тобто автономна САР має реалізувати перехідний процес, що сходиться до заданного значення режимного параметру, з оптимальними прямими показниками якості перехідного процесу. Таким чином, в структурному моделюванні САУ ТОУ моделюється як сукупність автономних САР режимних параметрів.

В ЛМІ WebStudio змодельовано Застосунок HMI-Standard функціональність (вікна «Menus», «Mimics», «Alarms», «Trends», «Models») і MES-Lite функціональність (вікна «Models», «Recipes», «Reports», «Schedules», «Simulation»). Назви вікон відповідають функціональності, яку вони візуалізують.

Додаткова функціональність програмно-технічного SIL-симулятора ATK TOU

• НІЛ-симуляція універсальної каскадної САР в софтПЛК CoDeSys. ТОУ реалізований спрощений (швидкісна та інерційна частини – по одній аперіодичній ланці першого порядку). Реалізована вся функціональність каскадної АСР. Реалізовані збурення зі сторони РО. Програмний компонент підтримується вікном візуалізації в софтПЛК

CoDeSys з елементами управління і багатоточковим трендом.

• VIL-симуляція універсальної каскадної САР в ЛМІ WebStudio. ТОУ реалізований спрощений (швидкісна та інерційна частини – по одній аперіодичній ланці першого порядку). Реалізована вся функціональність каскадної АСР. Реалізовані збурення зі сторони РО. Скрипт підтримується вікном візуалізації «Simulation» в ЛМІ WebStudio з елементами управління і багатоточковим трендом.

Примітка. Програмно-модельним інструментарієм для розробки полігонів імітаційного НІЛ-моделювання ATK в лабораторії ІМ ATK є програмно-технічний НІЛ-симулятор на платформі хардПЛК Unitronics OPLC UniStream.

Полігони імітаційного моделювання лабораторії ІМ ATK

1. Полігон імітаційного SIL-моделювання ATK пічних систем.
2. Полігон імітаційного SIL-моделювання ATK котельних систем.
3. Полігон імітаційного SIL-моделювання ATK інженерних систем.
4. Полігон імітаційного НІЛ-моделювання ATK теплоенергетичних систем.
5. Полігон імітаційного SIL-моделювання ATK з структурними регуляторами.
6. Полігон імітаційного SIL-моделювання ІВС теплоенергетичних режимних параметрів.
7. Полігон імітаційного НІЛ-моделювання ІВС теплоенергетичних режимних параметрів.



Розроблені полігони 1, 2, 3. Розробка полігонів 4, 5, 6, 7 планується на 2022-2023 навчальний рік.

**Висновки і рекомендації.** 1. Розроблений програмно-технічний SIL-симулятор є ефективним програмно-модельним інструментарієм розробки полігонів імітаційного SIL-моделювання АТК. 2. Розроблені полігони імітаційного SIL-

моделювання АТК можуть бути використані як в навчальному процесі (основне призначення), так і техно-робочому проектуванні чи модернізації АТК (опція). 3. Ідеологія імітаційного моделювання АТК може бути реалізована для будь-якого АТК, а також в MES-системах на зовсім іншій програмно-технічній платформі (як показано в роботі авторів [5]).

#### Список літератури:

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Санкт-Петербург, 2005. 400 с.
2. Рыбалев А.Н. Имитационное моделирование АСУ ТП. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. 408 с.
3. Батюк С.Г., Лобзов Н.С. Функціональне моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанного котла. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 5. С. 65–73.
4. Батюк С.Г., Лобзов Н.С. Структурне (імітаційне) моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанного котла. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 5. С. 74–82.
5. Батюк С.Г., Федь Т.І. Імітаційне моделювання АТК промислової логістики на основі програмного забезпечення Simio. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). № 6. С. 149–155.

#### **Batiuk S.G., Liadyshev D.K. SIMULATION MODELING OF HEAT ENERGY AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEXES**

*Simulation modeling of dynamic systems is a relevant direction and an effective toolkit of software modeling of dynamics using both universal and specialized software products. Simulation modeling of technologies, aggregates, productions and cyber-physical systems is software (virtual) modeling of physical (real) assets. Simulation modeling of an automated technological complex is a software and technical simulation of the controller and supervisory functionality of an automated control system using software (non-physical and non-mathematical) models (digital duplicates) of the technological control object. Functional simulation modeling of a dynamic system – simulation modeling of the functions of a dynamic system. Structural simulation modeling of a dynamic system – modeling of the interaction of structural parts of a dynamic system.*

*At the department of automation of thermal energy processes of the Kyiv Polytechnic Institute, polygons for simulation modeling of automated technological complexes of thermal energy regime parameters are being developed. The program and modeling toolkit for the development of the simulated SIL modeling range of the automated technological complex is: 1) the album of models "Modeling of elements and structures of industrial automatic control systems in Matlab Simulink" for simulated functional modeling of automatic control systems; 2) software-technical SIL simulator of automated technological complexes on the Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio platform for simulated structural modeling of automated technological complexes.*

*The developed software-technical SIL-simulator is an effective software-model toolkit for the development of simulation SIL-modeling polygons of automated technological complexes. The developed polygons of simulated SIL modeling of automated technological complexes can be used both in the educational process (main purpose) and in techno-working design or modernization of automated technological complexes (option). The ideology of simulation modeling of automated technological complexes can be implemented for any automated technological complex, as well as in MES systems on a completely different software and technical platform.*

**Key words:** *simulation modeling, simulation simulation polygon, software and technical simulator, simulation functional modeling, simulation structural modeling, SIL modeling, HIL modeling, digital doubles, digital twins, SAR mode parameter, automated technological complex.*

**Батюк С.Г.**

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

**Лядишев Д.К.**

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Успішне вирішення наукових і технічних задач, у тому числі забезпечення якості продукції, у значній мірі залежить від якості промислових вимірювань. У сучасній промисловості затрати праці на виконання вимірювань складають близько 10% загальних затрат праці на всіх стадіях створення і експлуатації продукції, а в окремих галузях промисловості досягають 50–60% (електронна, радіотехнічна тощо). Ефективність цих затрат визначається достовірністю і відтворюваністю вимірювань.

Вимірювання технологічних параметрів в автоматизації технологічних процесів має дві мети: 1) використання в системах автоматичного регулювання режимних параметрів, тобто в замкненому контурі регулювання; 2) інформування оператора про стан технологічного об'єкту управління. Відповідно, інформаційні функції автоматизованої системи управління технологічними процесами – це не тільки просте фізичне вимірювання технологічних параметрів сенсорами, але і реалізація надзвичайно важливих функцій первинної обробки виміряних сигналів в програмованих логічних контролерах і вторинної обробки виміряних даних в системах людинно-машинного інтерфейсу.

Найважливішою функцією первинної обробки виміряних сигналів в програмованих логічних контролерах є функція фільтрації сигналів і даних. Теплоенергетичні агрегати – «повільні» технологічного об'єкту управління, які самі є фільтрами низьких частот. Оптимальна фільтрація даних на теплоенергетичних об'єктах в умовах значних промислових перевищень – актуальна технічна задача. Дослідження ефективності зовнішньої і внутрішньої фільтрації в автоматизованих системах управління і її впливу на якість регулювання в системах автоматичного регулювання і якість візуалізації для оператора – важлива задача моделювання фільтрації і аналізу практичної реалізації алгоритмів фільтрації в програмованих логічних контролерах.

Фільтри низької частоти в програмованих логічних контролерах неефективні в замкненому контурі регулювання, так як вносять додаткову інерційність в контур регулювання. Фільтри низької частоти в програмованих логічних контролерах ефективні для фільтрації сигналу перед його візуалізацією або перед його передачею в систему людинно-машинного інтерфейсу. Фільтри високої частоти, як зовнішні, так і внутрішні, практично не можуть бути реалізовані, так як мають в своєму складі ланку реального диференціювання.

**Ключові слова:** промислові вимірювання, алгоритми первинної обробки сигналів вимірювання, алгоритми вторинної обробки даних вимірювання, зовнішня фільтрація, внутрішня фільтрація, моделювання фільтрації, система автоматичного регулювання, фільтр низької частоти, фільтр високої частоти.

**Постановка проблеми.** Успішне вирішення наукових і технічних задач, у тому числі забезпечення якості продукції, у значній мірі залежить від ступеня досягнення єдності і вірогідності (точності) вимірювань. Єдність вимірювань – стан вимірювань, за якого їхні результати виражені в узаконених одиницях, а похибки або невизначеності вимірювань відомі із заданою ймовірністю і не виходять за встановлені границі. Єдність вимірювань необхідна для забезпечення порівнюваності результатів вимірювань,

проведених у різних місцях, в різний час з використанням різних методів і засобів вимірювання. Точність вимірювань – характеристика ступеня наближення результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Для конкретних умов і цілей вимірювання існує свій раціональний рівень точності, котрий недоцільно перевищувати через зростання складності відповідних вимірювань. У сучасній промисловості затрати праці на виконання вимірювань складають близько 10% загальних затрат праці на всіх стадіях створення

і експлуатації продукції, а в окремих галузях промисловості досягають 50–60% (електронна, радіотехнічна тощо). Ефективність цих затрат визначається достовірністю і відтворюваністю вимірювань.

Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – це технологічний агрегат, який автоматизується. АСУТП (надалі просто АСУ) – автоматизована система управління технологічними процесами ТОУ. Програмно-технічною платформою АСУ є програмовані логічні контролери (ПЛК) і системи людинно-машинного інтерфейсу (ЛМІ). Оператор технологічного процесу через ЛМІ реалізує автоматизоване (за участі людини) управління технологічними процесами ТОУ. ІВС – інформаційно-вимірювальна система – підсистема в складі АСУ. ІВС – це сукупність вимірювальних каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори; реєструючі прилади; вхідні модулі ПЛК).

Технологічні параметри ТОУ – це параметри технологічного агрегату, які вимірюються для автоматизації технологічного агрегату. Вимірні технологічні параметри ТОУ підрозділяються за призначенням на три групи.

Режимні параметри – технологічні параметри, стабілізація яких на заданному значенні забезпечує ефективне функціонування ТОУ. Стабілізація режимних параметрів ТОУ – це управляючі функції АСУ, які реалізуються системами автоматичного регулювання (САР) режимних параметрів в складі АСУ.

Захисні параметри – технологічні параметри, вимірювання (неперервне) або контроль (датчики-реле параметрів) яких забезпечує реалізацію захистів ТОУ від неправильного управління. Реалізація технологічних захистів на основі захисних параметрів ТОУ – це захисні функції АСУ.

Контрольні параметри – технологічні параметри, які не приймають участі в реалізації управляючих або захисних функцій АСУ, а використовуються для додаткового інформування оператора.

Інформаційні функції АСУ – це функції вимірювання технологічних (режимних, захисних і контрольних) параметрів ТОУ.

**Аналіз проблеми.** Вимірювання технологічних параметрів в автоматизації технологічних процесів має дві мети: 1) використання в САР режимних параметрів ТОУ, тобто в замкненому контурі регулювання; 2) інформування оператора про стан ТОУ. Відповідно, інформаційні функції АСУ – це не тільки просте фізичне вимірювання технологічних параметрів сенсорами, але і реалізація надзвичайно важливих функцій первинної

обробки вимірних сигналів в ПЛК і вторинної обробки вимірних даних в ЛМІ.

### Типові функції первинної обробки даних в ПЛК

1. Фільтрація – програмно реалізована фільтрація вимірних сигналів.

2. Апроксимація – кусочно-лінійна апроксимація. Лінеаризація нелінійної характеристики вимірювання. Обмеження мінімального і максимального значень (нелінійність типу насичення).

3. Масштабування – лінійне перетворення діапазону (шкали) вимірювання.

4. Сповільнення – обмеження швидкості зміни параметру (нелінійність типу насичення).

5. Порівняння – порівняння з уставкою. РІВНО, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДІАПАЗОН. Обмеження значення (нелінійність типу насичення).

6. Гістерезис – реалізація зони нечутливості і зони повернення (двопозиційна нелінійність; релейне регулювання).

7. Алармування – формування події тривоги (аларму) технологічної (попереджувальної) або аварійної.

8. Аналітика – статистичний аналіз. Виділення найменшого, найбільшого і середнього значень. Розрахунок дисперсії.

9. Інтегрування – лінійне інтегрування параметру (площа під графіком зміни параметру).

10. Лічильник – математична інкрементація і декрементація. Обрахування дискретних подій до уставки лічильника.

11. Таймер – реалізація часових затримок на величину уставки таймеру.

12. NOT – логічна операція НІ. Значення виходу протилежне значенню входу.

13. AND – логічна операція І. Вихід = 1, якщо два входи = 1.

14. OR – логічна операція АБО. Вихід = 1, якщо хоча б один з входів = 1.

15. XOR – логічна операція виключного АБО. Вихід = 1, якщо тільки один з входів = 1.

16. Генератор – генерація аналогових і дискретних даних константних і періодичних.

17. Перетворення типів даних – вимушене явне перетворення типів даних, як правило, REAL>INT.

Типовий порядок первинної обробки аналогових сигналів (INT, REAL) в ПЛК: Сигнал > Фільтрація – Апроксимація – Масштабування – Сповільнення – Порівняння, Аналітика, Алармування > Дані.

Порядок обробки дискретних сигналів (BOOL) в ПЛК – залежить від логіки обробки і не може бути типовим.

**Постановка завдання.** Найважливішою функцією первинної обробки вимірних сигналів в ПЛК є функція фільтрації сигналів і даних. Теплоенергетичні ТООУ – «повільні» ТООУ, які самі є фільтрами низьких частот. Оптимальна фільтрація даних на теплоенергетичних об'єктах в умовах значних промислових перешкод – актуальна технічна задача, що може бути ефективно вирішена (наприклад, як в роботі авторів [1]). Дослідження ефективності зовнішньої і внутрішньої фільтрації в АСУ і її впливу на якість регулювання в САР і якість візуалізації для оператора – важлива задача моделювання фільтрації і аналізу практичної реалізації алгоритмів фільтрації в ПЛК.

**Результати моделювання.** Далі розглядаються питання класифікації похибок вимірювання, класифікації перешкод, функціонального моделювання фільтрації сигналів в САР і реалізації алгоритмів фільтрації в ПЛК. Моделі реалізовані в системі комп'ютерної математики (СКМ) MatLab Simulink.

### Похибка вимірювання

Похибка вимірювання – це кількісне значення точності вимірювання. Це характеристика ступеня відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Для конкретних умов і цілей вимірювання існує свій раціональний рівень похибки, котрий недоцільно зменшувати через зростання складності відповідних вимірювань. Чим більше похибка вимірювання, тем менше точність; чим менша похибка, тим вища точність вимірювання. В лінійних системах всі похибки є адитивними, тобто додаються ( $+$  або  $-$ ) до істинного значення величини, тому вони однакові у всьому діапазоні вимірювання.

Похибки вимірювання залежать від перешкод процесу вимірювання. Похибку вимірювання класифікують за 1) джерелом походження перешкоди вимірювання і 2) способом походження перешкоди вимірювання. За джерелом походження перешкоди вирізняють внутрішню (інструментальну) і зовнішню (методичну) похибки вимірювання.

1. Внутрішня похибка вимірювання – це похибка самих компонентів ВК і залежить від типу і якості компонента (наприклад, давача). Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

2. Зовнішня похибка вимірювання – це результат впливу на компонент ВК зовнішніх перешкод і способу (методу) монтажу компонента (наприклад, давача). Вона не залежить від величини

самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

За способом походження перешкоди вимірювання вирізняють постійну (систематичну) і стохастичну (випадкову) похибки вимірювання.

3. Постійна похибка вимірювання (ППВ) – це постійне відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

4. Стохастична похибка вимірювання (СПВ) – це випадкове відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

### До визначення СПВ

З позицій теорії ймовірності і математичної статистики СПВ є результатом дії багатьох випадкових чинників. В цьому випадку розподілення значень вимірювання підкоряється нормальному закону розподілення Гауса. Тому результат випадкового розподілення значень вимірювання характеризується двома детермінованими показниками – математичним очікуванням і дисперсією. Математичне очікування – це середнє арифметичне всіх значень вимірювання в генеральній сукупності (велика кількість вимірювань). Це і є значення вимірюваної величини. Реальна сукупність вимірювань має кінцеву кількість вимірювань і називається вибіркою вимірювань. Середнє арифметичне вибірки відрізняється від математичного очікування і характеризується дисперсією. Дисперсія – це середнє значення квадратів відхилення результатів вимірювання від середнього арифметичного вимірювань, тобто від вимірюваного значення величини (примітка: квадрат відхилення береться тому, щоб відхилення з різними знаками не компенсували один одного). Корінь квадратний із дисперсії називається середньоквадратичним відхиленням (СКВ) або стандартним відхиленням. Достовірність вимірювання характеризується довірчим діапазоном вимірювання  $ДДВ = 3 \times СКВ$ . Саме в цей діапазон попадають 99,9% результатів вимірювання.

Для засобів вимірювання клас точності являє собою межу основної допустимої похибки вимірювання.

Термін «межа» має статистичний характер і вказує на те, що з ймовірністю 0,999 всі випадкові відхилення вимірюваної величини вкладаються в довірчий діапазон вимірювання ДДВ.

Термін «основна» вказує на те, що клас точності нормує похибку для нормальних умов експлуатації (тобто коли задовольняються вимоги до температури, вологості і тиску навколишнього середовища і вимоги до живлення приладів). Якщо вказані технічні вимоги не виконуються, з'являється додаткова похибка і сумарна похибка перевищує клас точності приладу.

Похибка всього ВК (сумарна похибка ВК) дорівнює квадратичній сумі похибок окремих компонентів ВК. Нижче наведені формули для розрахунку відповідно відносної і абсолютної похибок ВК на основі похибок компонентів ВК (якщо діапазони вимірювання компонентів ВК однакові).

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad \Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}$$

Слід розрізняти похибку одноразового вимірювання і похибку багаторазового вимірювання. На практиці ці поняття часто не розрізняють, і говорять про похибки вимірювання, маючи на увазі саме похибки одноразового вимірювання. Різниця між цими поняттями принципова. Похибка одноразового вимірювання визначається класом точності приладу. Нижче наведені формули для розрахунку відповідно відносної і абсолютної похибок багаторазового вимірювання на основі похибка одноразового вимірювання і кількості (k) послідовних вимірювань (формула середньоквадратичного значення).

$$\frac{\varepsilon}{\sqrt{k}} \quad \frac{\Delta}{\sqrt{k}}$$

При багаторазовому вимірюванні навіть на низькоточному приладі можливо отримати високу точність вимірювання. Наприклад, для 100 вимірювань похибка вимірювання знижується квадратично, тобто в 10 разів. Так як в перехідному процесі в САР динамічне вимірювання є одноразовим, а статичне – багаторазовим, то клас точності ВК впливає на якість перехідного процесу (динамічні показники якості), але не впливає на точність стабілізації в кінці перехідного процесу (статичний показник якості) – ПІ-регулятор при будь-якій стохастичній похибці вимірювання забезпечує нульову статичну помилку регулювання.

До визначення похибки вимірювання компоненту ВК

Внутрішня ППВ компонента ВК виникає внаслідок несправності компоненту. Зовнішня ППВ виникає внаслідок неправильного монтажу і неправильної експлуатації компоненту ВК, елек-

тростатичного наведення і неправильного заземлення (виникає додаткова різниця потенціалів, тобто напруга). Сумарну внутрішню і зовнішню ППВ об'єднують в єдину ППВ.

Кожний компонент ВК має внутрішню СПВ, яка характеризується класом точності компонента. Клас точності визначає значення ДДВ цього компоненту.

Наприклад, ВК виміряв значення температури 30 градусів. ДДВ, обчислений на основі класу точності ВК, є, наприклад, 5 градусів. Це означає, що вимірний параметр з ймовірністю 99,9% знаходиться в діапазоні  $30 \pm 5$  градусів, тобто в діапазоні 25...35 градусів.

Зовнішня СПВ – це результат впливу на компонент ВК зовнішніх стохастичних перешкод внаслідок, в основному, електромагнітного наведення від силових кабелів і потужного електротехнічного обладнання (яке працює під великим струмом, так як «наводить струм, а не напруга»).

Пригнічення похибки (= пригнічення перешкоди = пригнічення впливу перешкоди) – зменшення похибки до прийнятного рівня, котрий недоцільно зменшувати через зростання складності засобів і алгоритмів пригнічення похибки.

Пригнічення ППВ полягає в усуненні джерела виникнення ППВ, тобто в ремонті компоненту ВК, правильному монтажі і правильній експлуатації компоненту ВК, ліквідації електростатичного наведення і правильного заземлення.

Радикальний спосіб пригнічення ППВ – коректування похибки адитивним зміщенням на величину похибки вимірюного значення параметру або заданого значення вимірюного регульованого параметру. Легше всього це зробити в ПЛК, можливо зробити в багатоканальному реєстраторі. Але це хибний шлях і виправданий тільки як тимчасовий засіб.

Внутрішня СПВ компоненту ВК не може бути пригнічена, вона може бути тільки врахована при визначенні ДДВ всього ВК. ДДВ ВК розраховується на основі паспортних ДДВ компонентів ВК.

Зовнішня СПВ компоненту ВК пригнічується фільтрацією вхідних (вимірних) сигналів. Використовуються фільтри низьких частот (ФНЧ), фільтри високих частот (ФВЧ) і фільтри смути частот (ФСЧ).

На рисунку 1 представлені функціональні моделі ФНЧ, ФВЧ і ФСЧ в СКМ Matlab Simulink.

ФНЧ пропускає з входу на вихід сигнали низьких частот, а пригнічує сигнали високих частот. Пригнічення високих частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихід-

Фільтри нижніх частот, верхніх частот, смуговий

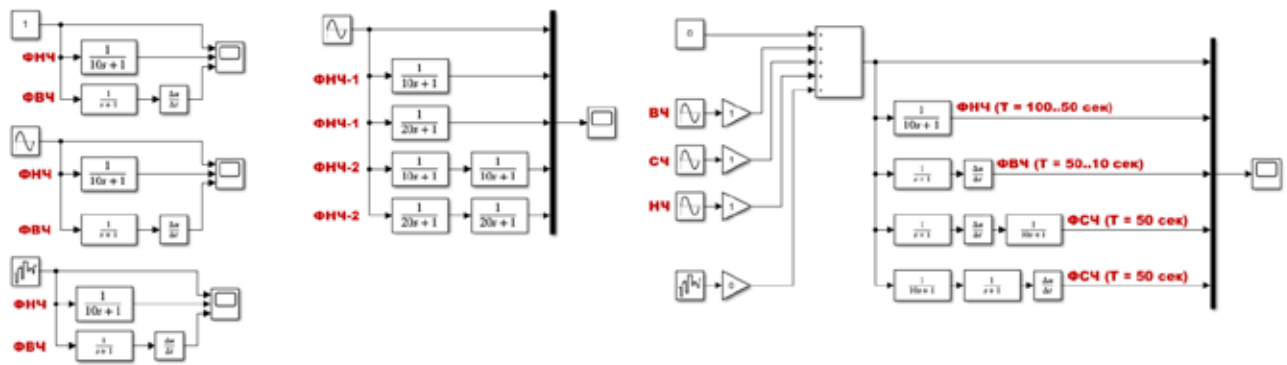


Рис. 1. Моделі ФНЧ, ФВЧ, ФСЧ в СКМ Matlab Simulink

ного сигналу зберігається. Приклади ФНЧ 1-го і 2-го порядків – аперіодичні ланки 1-го і 2-го порядків. Частота відфільтрованого і пригніченого сигналів визначається так званою частотою частотою зрізу. Частота зрізу – це частота, вище якої потужність вихідного сигналу (квадрат амплітуди) фільтра зменшується вдвічі від потужності в смузі пропускання (тобто, амплітуда вихідного сигналу зменшується до  $\sim 70\%$  від вхідного сигналу).

ФВЧ пропускає з входу на вихід сигнали високих частот, а пригнічує сигнали низьких частот. Пригнічення низьких частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. Приклади ФВЧ 1-го і 2-го порядків – ланки реального диференціювання 1-го і 2-го порядків. Частота відфільтрованого і пригніченого сигналів визначається так званою частотою частотою зрізу. Частота зрізу – це частота, нижче якої потужність (квадрат амплітуди) вихідного сигналу фільтра зменшується вдвічі від потужності в смузі пропускання (тобто, амплітуда вихідного сигналу зменшується до  $\sim 70\%$  від вхідного сигналу).

ФСЧ пропускає з входу на вихід сигнали смуги частот  $f_1$  і  $f_2$ , а пригнічує сигнали нижчих за  $f_1$  частот і вищих за  $f_2$  частот. Пригнічення низьких і високих частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. ФСЧ є послідовним з'єднанням: або ФНЧ (фільтрація нижчих за  $f_2$  частот) і ФВЧ (фільтрація вищих за  $f_1$  частот); або ФВЧ (фільтрація вищих за  $f_1$  частот) і ФНЧ (фільтрація нижчих за  $f_2$  частот). Частоти відфільтрованого і пригніченого сигналів визначаються так званими частотами зрізу. Частоти зрізу – це дві частоти, нижче якої і вище якої потужність вихідного сигналу (квадрат амплітуди) фільтра зменшується вдвічі від потужності в смузі пропускання (тобто, амплітуда

вихідного сигналу зменшується до  $\sim 70\%$  від вхідного сигналу).

### Вплив ППВ і СПВ на роботу САР

ППВ є найбільш небезпечною похибкою. ППВ можливо пригнітити 2-ма способами: 1) усунути джерело похибки; 2) відкоректувати значення задавача на величину похибки (наприклад, якщо справжня температура 30 градусів, а давач показує 25 градусів, то в САР потрібно задавати значення 25 градусів, «тримаючи в умі», що насправді це 30 градусів; так само з виведенням значення на ПП/РП – треба «тримати в умі», що насправді показуються не 25, а 30 градусів). Крім того, ППВ важко, а в багатьох випадках неможливо виявити.

Внутрішня СПВ компоненту ВК враховується при визначенні ДДВ всього ВК на основі класів точності компонентів ВК.

ППВ і СПВ по різному (навіть протилежно) впливають на якість регулювання, тобто на якість перехідних процесів в САР. ППВ не впливає на динаміку перехідного процесу і його динамічні показники, але впливає на статичну похибку регулювання (відхилення від завдання в сталому значенні регульованого параметру в кінці перехідного процесу). СПВ впливає на динаміку перехідного процесу і його динамічні показники, але не впливає на статичну похибку регулювання (відхилення від завдання в сталому значенні регульованого параметру в кінці перехідного процесу).

Зовнішня СПВ має бути пригнічена фільтрацією. Розрізняють зовнішню і внутрішню фільтрацію ВК. Зовнішня фільтрація – це використання зовнішніх до ВК і ПЛК фільтрів.

### Зовнішня фільтрація

- Екранування компонентів ВК і ПЛК від електромагнітних наведень шляхом встановлення в спеціалізовані металеві шафи з їх заземленням.

Це запобігає проникненню паразитних струмів в електричні кола компонентів ВК.

- Прокладання сигнальних кабелів окремо від силових кабелів, тобто в окремих кабельних каналах і в окремих металевих трубах. Це запобігає електромагнітному наведенню і, відповідно, проникненню паразитних струмів в електричні кола компонентів ВК.

- Використання скручених пар (біфілярні провідники – розташовані один біля одного провідники; біфілярна скручена або вита пара – twisted pair – скручені навколо один одного два провідники) для: 1) зменшення площі електромагнітного наведення за рахунок біфілярності провідників і, відповідно, зменшення електромагнітного наведення паразитних струмів; 2) додаткової взаємної компенсації наведених паразитних струмів в плюсовому і мінусовому провідниках за рахунок взаємно-протилежних напрямів струмів в плюсовому і мінусовому провідниках внаслідок різнополярності плюсового і мінусового провідників.

- Заземлення екранів кабелів. Заземлення металевих труб, в яких прокладені сигнальні кабелі. Електромагнітно наведені паразитні струми «стікають в землю» і не проникають в електричні кола компонентів ВК.

Правильне заземлення – заземлення системи в одній точці; тобто точки заземлення всіх приладів повинні бути індивідуально підключені до єдиної спільної заземленої точки заземлення системи (бажано до металевого шасі шафи). Фізичне заземлення в одній фізичній точці заземлення запобігає виникненню паразитних струмів в провідниках між заземленими точками заземлення.

### **Внутрішня фільтрація – програмна фільтрація в ПЛК**

Програмна фільтрація в ПЛК здійснюється або функціональними блоками (графічна мова ПЛК), або різницевами рівняннями (текстова мова ПЛК) ФНЧ – аперіодичними ланками 1-го або 2-го порядків. ФВЧ і ФСЧ в ПЛК не використовуються, так як 1) корисний сигнал завжди низькочастотний (тобто він може пригнічуватись); 2) сам ОУ і сама САР є ФНЧ (тобто сам ОУ і сама САР пригнічує високочастотні перешкоди); 3) програмно ФВЧ і ФСЧ (відповідно програмний реальний диференціатор і програмна інтегродиференціальна ланка) в ПЛК реалізується неефективно (неефективною є реалізація саме операції ідеального диференціювання).

Задача внутрішньої фільтрації сигналу в ПЛК – відфільтрувати корисний сигнал (значення регу-

льованого параметру) і пригнітити перешкоду. Корисний сигнал завжди низькочастотний. Якщо сигнал перешкоди високочастотний, то треба використовувати ФНЧ, і це ефективно. Якщо сигнал перешкоди нижчої частоти, ніж корисний, то треба використовувати ФВЧ, що неефективно. Саме тому зовнішні фільтри не мають пропускати на вхід САР низькочастотну перешкоду, так як вона буде фактично однакової частоти з корисним сигналом (в цьому випадку САР буде реагувати на перешкоду як на корисний сигнал хибним регулюванням, що неприпустимо). Саме тому зовнішні фільтри для САР мають бути ФВЧ, або, краще, ФСЧ (пригнічувати низькочастотну перешкоду; пропускати більш високочастотний корисний сигнал; пригнічувати ще більш високочастотну перешкоду). Це відрізняється від радіоприладів (смартфонів), де принципово використовуються внутрішні ФНЧ, які пригнічують високочастотну перешкоду (атмосферні електромагнітні наведення) і пропускають низькочастотний корисний сигнал (голосовий сигнал).

Слід розрізняти ВК з виходом на показуючий або реєструючий прилад (ВК-ПРП) і ВК з виходом на регулятор в ПЛК (ВК-РЕГ).

Для ВК-ПРП внутрішня програмна фільтрація засобами ФНЧ є ефективною, так як відфільтрований сигнал без високочастотних перешкод краще візуалізується. Для ВК-РЕГ внутрішня програмна фільтрація засобами ФНЧ є неефективною, так як це означає введення в зворотний зв'язок додаткової аперіодичної ланки 1-го порядку, тобто послідовне підключення до ОУ додаткової аперіодичної ланки 1-го порядку (тобто ускладнення ОУ – він стає більш інерційним – і погіршення якості регулювання). Сам ОУ і сама САР вже є ФНЧ.

**Висновок.** Фільтрацію засобами ФНЧ в ПЛК використовувати тільки для ВК з виходом на показуючий або реєструючий прилад, але не використовувати для фільтрації в замкненому контурі регулювання.

### **Загальні висновки щодо фільтрації**

Нижче викладені результати функціонального моделювання фільтрації САР режимного параметру.

На рисунку 2 представлена функціональна модель фільтрації виміряного сигналу в ПЛК в СКМ Matlab Simulink. Моделювались зовнішні і внутрішні фільтри як ФНЧ і як ФВЧ.

Моделювання зовнішньої і внутрішньої фільтрації в типовій теплоенергетичній САР дало наступні результати (типівість промислової САР як теплоенергетичної визначена «повільними»

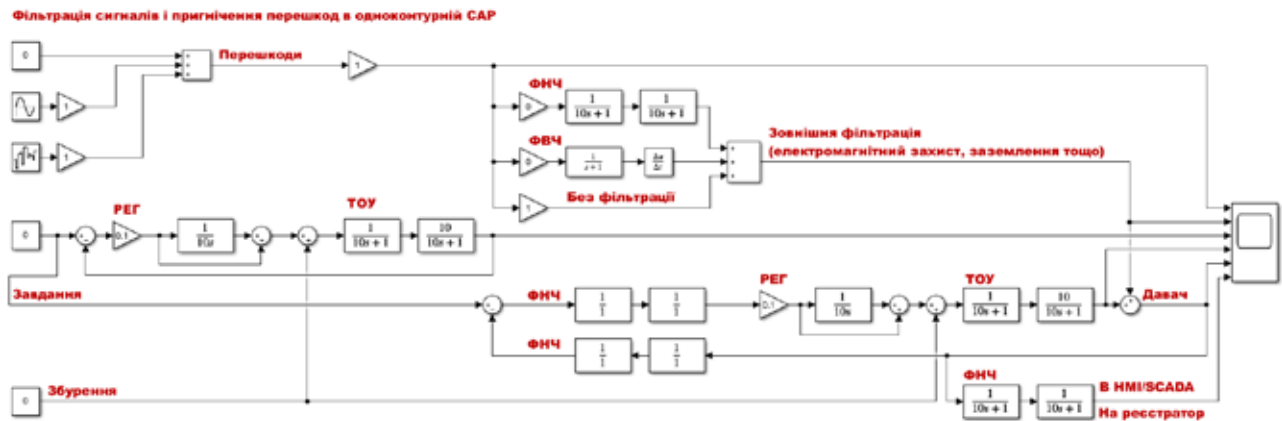


Рис. 2. Моделювання фільтрації в САР режмового параметру в СКМ Matlab Simulink

параметрами об'єкту управління і «повільними» параметрами ПІ-регулятора).

Зовнішня фільтрація є більш ефективною, ніж внутрішня, хоча і набагато дорожчою. Треба використовувати дорогі зовнішні фільтри у вигляді електромагнітних екранів, дорогих скручених пар, сучасної кабельної системи, сучасної системи заземлення. Ці фільтри є фільтрами низьких частот (ФНЧ), тобто зовнішня фільтрація (фільтрація екрануванням і заземленням) є низькочастотною фільтрацією.

Треба розрізнити, для чого використовується відфільтрований сигнал – для регулювання чи виключно для інформації (візуалізації, алармування, архівації). Задачею класичної зовнішньої фільтрації є пригнічення високочастотних перешкод і пропускання низькочастотних сигналів, які вважаються корисними, тобто робочими; це ФНЧ. Але для промислових ТОУ цього недостатньо, так як не всі низькочастотні сигнали є корисними, а можуть бути низькочастотними перешкодами; САР такі перешкоди не відрізняє від низькочастотних коливань регульованих параметрів і реагує хибним регулюванням; крім того, сама САР є ФНЧ, тобто практично не реагує на високочастотні перешкоди. Введення додаткових внутрішніх ФНЧ в замкнений контур регулювання погіршує якість регулювання. Таким чином, з позицій регулювання як зовнішня, так і внутрішня низькочастотна фільтрація (ФНЧ) є неефективною. Навпаки, ефективною є високочастотна (краще смугова) фільтрація перешкод; але: 1) високочастотна фільтрація (ФВЧ) і смугова фільтрація (ФСЧ) практично не можуть бути реалізовані, як зовнішньо (екрануванням), так і внутрішньо (програмно); всі фільтри, які практично можливо реалізувати, є ФНЧ; 2) високочастотна фільтрація перешкод може пригнічувати корисний низько-

частотний сигнал (а не тільки шкідливу низькочастотну перешкоду).

Зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація (ФНЧ) є ефективною саме для інформаційних задач (систем), де немає замкнених контурів регулювання. Ефективна зовнішня фільтрація реалізується ефективним екрануванням. Ефективна внутрішня фільтрація реалізується програмно розробленими ФНЧ; переважно достатньо аперіодичної ланки 1-го порядку, інколи 2-го порядку. Для промислових інформаційних систем високочастотна і смугова фільтрації (ФВЧ і ФСЧ) не мають сенсу; високочастотна фільтрація (ФВЧ) зрідка має сенс тільки для швидкісних технологічних процесів, наприклад, для зварювання (необхідно відфільтрувати корисні високочастотні сигнали і пригнітити низькочастотну перешкоду, як правило, за живленням, тобто частотою змінного струму 50 Гц). В загальному випадку, найбільш шкідливими для інформаційних систем є саме відносно низькочастотні перешкоди частотою 50 Гц, продуковані електромагнітним наведенням. Задача зовнішньої і внутрішньої фільтрації для інформаційних систем – пригнітити перешкоду 50 Гц і відфільтрувати (пропустити на вихід) корисний низькочастотний сигнал (частотою, меншою за 50 Гц).

Так як АСУ є як автоматичною, так і інформаційною системою (включає в себе як ІВС в складі САР, так і автономні ІВС), то зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація є необхідною для АСУ (саме для автономних ІВС, які є невід'ємною частиною АСУ; автономні інформаційні функції є такі ж важливі, як і функції регулювання).

Таким чином, фінансові вкладення в коштовну зовнішню фільтрацію є ефективними і рекомендованими, так як зменшать загальну вартість володіння (ТСО – total cost of ownership) АСУТП за період життєвого циклу ТОУ.



**Висновки і рекомендації.** 1. Зовнішня низькочастотна фільтрація (апаратно реалізоване екранування від електромагнітних наведень) програмно-технічних засобів САР є неефективною, так як вона пропускає на вхід регулятора низькочастотну перешкоду, яку регулятор не може відрізнити від низькочастотного вимірюваного параметру, сприймає як зміну регульованого параметру і відповідно реалізують регульовальну дію, яка, в даному випадку, є зайвою і помилковою. Екранування має сенс виключно як засіб запобігання електромагнітних уражень апаратури САР. 2. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК (програмно реалізованого ФНЧ в ПЛК) в замкне-

ному контурі регулювання є неефективним, так як фактично вносить додаткову інерційність в контур регулювання. Так як ОУ сам ФНЧ, то високочастотні перешкоди практично не впливають на якість регулювання в САР. 3. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК є ефективним для фільтрації сигналу, який передається для візуалізації на реєструючий прилад або в НМІ/SCADA-систему. 4. Як внутрішній програмний ФВЧ в ПЛК, так і зовнішня апаратна високочастотна фільтрація не може бути реалізована, так як ФВЧ повинен мати в своєму складі ланку реального диференціювання, що практично неможливо реалізувати як апаратно, так і програмно.

#### Список літератури:

1. Батюк С.Г., Олійник С.Ю. Методика оптимальної фільтрації даних температурного контролю турбогенераторів в умовах значних промислових перешкод. *Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси і системи*. 2009. № 1 (23). С. 147–151.

#### **Batiuk S.G., Liadyshev D.K. SIMULATION OF FILTRATION IN HEAT AND POWER SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL**

*The successful solution of scientific and technical problems, including product quality assurance, largely depends on the quality of industrial measurements. In modern industry, labor costs for measurements are about 10% of total labor costs at all stages of creation and operation of products, and in some industries reach 50-60% (electronic, radio, etc.). The efficiency of these costs is determined by the reliability and reproducibility of measurements.*

*Measurement of technological parameters in the automation of technological processes has two purposes: 1) the use in systems of automatic control of mode parameters, ie in a closed control loop; 2) informing the operator about the state of the technological control object. Accordingly, the information functions of the automated process control system are not only simple physical measurement of technological parameters by sensors, but also the implementation of extremely important functions of primary processing of measured signals in programmed logic controllers and secondary processing of measured data in human-machine interface systems.*

*The most important function of the primary processing of measured signals in programmable logic controllers is the function of filtering signals and data. Heat generating units are "slow" technological control objects, which are themselves low-pass filters. Optimal data filtering at thermal power facilities in the conditions of significant industrial obstacles is an urgent technical task. The study of the efficiency of external and internal filtering in automated control systems and its impact on the quality of control in automatic control systems and visualization quality for the operator is an important task of modeling filtering and analysis of practical implementation of filtering algorithms in programmable logic controllers.*

*Low-pass filters in programmable logic controllers are inefficient in a closed control loop, as they bring additional inertia to the control loop. Low-pass filters in programmable logic controllers are effective for filtering a signal before it is visualized or before it is transmitted to the human-machine interface system. High-pass filters, both external and internal, can hardly be implemented, as they include a link of real differentiation.*

**Key words:** *industrial measurements, algorithms of primary processing of measurement signals, algorithms of secondary processing of measurement data, external filtering, internal filtering, filtering modeling, automatic control system, low frequency filter, high frequency filter.*

**Блінцов В.С.**

Херсонський навчально-науковий інститут  
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Грудініна Г.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Буруніна Ж.Ю.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Надточий А.В.**

Херсонський навчально-науковий інститут  
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА

*Удосконалено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води, що набігає.*

*Для досягнення максимальної швидкодії при переході з однієї швидкості руху автономного ненаселеного підводного апарата на будь яку іншу задану швидкість пропонується застосування оптимального керування з перемиканням керуючого впливу за релейним законом. Система автоматичного керування містить регулятор, який в реальному часі обчислює значення і час перемикання керуючого сигналу. Регулятор побудовано на основі штучної нейронної мережі, яка апроксимує функцію часу перемикання від початкової та заданої швидкості підводного апарата. База даних для навчання штучної нейронної мережі отримана шляхом комп'ютерного експерименту з використанням математичної моделі автономного ненаселеного підводного апарата.*

*Для стабілізації швидкості руху підводного апарата при маневровому русі або під час впливу течії розроблено регулятор, що корегує значення керуючого сигналу відповідно до зміни упору його рушійно-кермового пристрою.*

*Для встановлення залежності загального упору рушійно-кермового пристрою, що застосовуються для автономних ненаселених підводних апаратів міні та малого класу, використано експериментальні дані, отримані шляхом математичного моделювання динаміки підводного апарата в системі Simulink Matlab.*

*Дослідження гідродинамічних характеристик гребного гвинта рушійно-кермового пристрою, розташованого в напрямній та поворотній насадках, проведено методами обчислювальної гідродинаміки і з застосуванням програмного комплексу FlowVision CFD. Встановлено, що відхилення упору РКП при куті перекладки насадки  $\delta = 30^\circ$  залежить від швидкості потоку та може перевищувати 50 відсотків. Відхилення упору при роботі САК становить близько 2 відсотків. Таке незначне відхилення упору рушійно-кермового пристрою майже не впливає на швидкість руху АНПА. Розроблений регулятор дозволяє компенсувати втрату упору рушійя, без відпрацювання помилки, що підвищує точність роботи системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА.*

**Ключові слова:** автономний ненаселений підводний апарат, рушійно-кермовий пристрій, автоматичне керування.

**Постановка проблеми.** Для виконання багатьох підводних робіт широко застосовуються автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) міні та малого класу, вагою від 20 до 500 кг. Аналіз режимів роботи та умов експлуатації таких АНПА показує, що вони працюють у складних гідрометеорологічних умовах та

в умовах стисненої підводної навігації. Тому сучасною тенденцією подальшого розвитку систем автоматичного керування (САК) рухом АНПА є підвищення вимог до точності керованого руху апарата по заданій траєкторії, досягнення максимальної швидкодії при ступінчастому русі.

Для багатьох виконуваних місій успіх може залежати від спроможності рушійно-кермового пристрою (РКП) АНПА забезпечувати необхідну точність його стабілізованого руху та позиціонування. Підвищення швидкодії та точність підтримання заданої швидкості руху підводного апарату за умов зовнішнього впливу відіграють важливу роль у завданні стабілізованого руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд науково-технічної літератури по системам керування показує, що магістральним напрямком подальшого розвитку теорії синтезу САК АНПА в умовах невизначеності його параметрів та характеристик зовнішнього середовища є застосування елементів штучного інтелекту – нечітких і нейромережних регуляторів, а також регуляторів на базі застосування інверсних моделей об'єкту керування. При цьому математичне моделювання визнається як ефективний засіб перевірки роботи розробленої системи керування, що надає можливість уточнювати важливі параметри та гідродинамічні характеристики об'єкту керування.

Авторами [1] розроблено математичну модель підводного роботу «Есо Маррег», заснованого на розрахунках з використанням CFD-пакетів. У статті розкривається питання необхідності контролю важливих гідродинамічних параметрів апарату та застосування відповідного середовища моделювання. Однак питання уточнення характеристик упору та потужності РКП підводного апарата при його маневруванні не розглядається.

Роботи [2; 3] спрямовані на розробку динамічної моделі АНПА як об'єкту керування, заснованої на наборі проведених експериментів. Автори вказують на необхідність приділити увагу нелінійним параметрам, зокрема, упору гребного гвинта, у роботі в косому потоці води.

Багато робіт присвячено питанню розробки САК траєкторним рухом АНПА. На прикладі завдання руху АНПА у складних умовах автори [4] методом комп'ютерного моделювання аналізують якість методологій проходження перешкод з урахуванням дії зовнішнього збурення. Виявлено погіршення ефективності застосованих методик при дії океанічної течії. Пропонується її компенсація заздалегідь визначеними експериментальним шляхом прикладеними силами та застосуванням додаткових підрулюючих пристроїв. Але в роботі не враховується одночасна зміна швидкості руху апарату або течії, що набігає. Отже, зміна упору РКП також не враховується.

Для таких типових траєкторій руху АНПА (занурення під стабільним кутом тощо) автори [5]

пропонують застосувати ПД-регулятори із зворотнім зв'язком та доводять ефективність застосування допоміжних засобів керування для виконання маневрів. Питання стабілізації швидкості руху апарату не досліджуються.

В роботі [6] для підвищення якості керування маневровим рухом АНПА автори пропонують застосувати векторний розподіл напрямків руху. Проте, представлений регулятор не належить до класу високоточних систем керування, його головною перевагою є спрощене представлення просторового руху, що полегшує процес керування апаратом.

Модель роботи РКП в умовах збурень навколишнього середовища представлена у роботі [7]. Встановлено, що при збільшенні швидкості руху РКП (в даному випадку без врахування впливу корпусу) та збільшенні кута повороту стерна сила упору значно зменшується навіть у чистій воді. У висновках автори підкреслюють важливість проведення експериментальних досліджень методом математичного моделювання.

Виконаний огляд свідчить, що попри добре вивчені питання математичного моделювання АНПА все більше уваги приділяється питанню підвищення точності керованого руху підводних апаратів і, зокрема, дослідженням гідродинамічних параметрів РКП, що функціонують у скошеному потоці води.

**Постановка завдання.** Метою роботи є удосконалення структури системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води.

Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язано наступні задачі:

- обрано математичну модель руху АНПА, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води, що набігає;
- розроблено та досліджено структуру САК швидкістю руху АНПА, до складу якої входить оптимальний за швидкодією регулятор, який реалізує ступінчасту зміну керуючого сигналу;
- розроблено та досліджено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА зі стабілізацією упору його РКП у маневрових режимах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В основу математичної моделі динаміки АНПА покладені рівняння динаміки поступального та обертального руху твердого тіла та кінематичні рівняння зв'язку кутових і лінійних швидкостей

[8]. Зазвичай гідродинамічні обводи корпусів АНПА обирають такими, щоб їх обтікання потоком води мало ламінарний характер. При цьому РКП виносять за корпус АНПА так, що гребний гвинт працює у практично не збуреному потоці (див. рис. 1).

В роботі розглядається АНПА, що має рушій, співвісний зв'язаній системі координат і вектор упору якого проходить через центр мас апарата.

Основними складовими рушійно-кермового пристрою АНПА є гребний електродвигун (ГЕД), редуктор-валопровід (РВ) та гребний гвинт (ГГ), розміщений у напрямній чи поворотній насадці, які моделюються відомою системою нелінійних диференціальних рівнянь [8].

Упор РКП  $F_k$  можна представити у вигляді суми упорів гребного гвинта  $F_{ГГ}$  та самої насадки  $F_n$  [9]:

$$F_k = F_{ГГ} + F_n. \quad (1)$$

При перекладанні насадки на кут  $\delta_n$  симетричність її обтікання потоком рушія порушується, що призводить до появи складової швидкості  $\vec{V}_n$ , усереднений напрям якої може бути прийнято перпендикулярним до вісі насадки. Тоді, вісь потоку РКП, згідно постулату Жуковського-Чаплигіна і рівнянню  $\vec{V}_\delta = \vec{V} - \vec{V}_n$ , відхиляється від

вісі гребного валу в ту ж сторону, що і насадка, на деякий кут  $\delta_c$ . Цей кут залежить від відносної довжини насадки  $\bar{l}_n$  і може бути виражений наступним чином [10]:  $\delta_c = \theta_n \delta_n = (1 - a_n \delta_n) \delta_n$ , де  $a_n$  – коефіцієнт апроксимації, який для насадки без стабілізатора, визначається за виразом:  $a_n = 0,04838 - 0,067865 \bar{l}_n + 0,023328 \bar{l}_n^2$ .

При перекладанні насадки (рис. 2) упор РКП  $\vec{F}_k$  розкладається на дві складові: реакцію відхиленого на кут  $\delta_c$  потоку  $\vec{F}_\delta$  і додаткову реакцію  $\vec{R}_\delta$ , що виникає при набіганні частини потоку на відхилений профіль насадки.

Тому:

$$\vec{F}_\delta = \vec{F}_k - \vec{R}_\delta. \quad (2)$$

Проектування рівності (6) на діаметральну та горизонтальну площини дозволяє отримати наступний результат [11]:

$$F_x = F_\delta \cos \delta_c = F_k (1 - \sin^2(\theta_n \delta_n)), \quad (3)$$

$$F_y = F_\delta \sin \delta_c = F_k \sin(\theta_n \delta_n) \cos(\theta_n \delta_n). \quad (4)$$

Внаслідок зміни сили упору, при зміні кута потоку, зростає і зусилля на гребному валу. При цьому, обертальний момент на валу ГГ визначають наступним чином [11]:



Рис. 1. Зовнішній вигляд АНПА з винесеним поза корпус РКП: а – АНПА «PingGuin» (Німеччина); б – АНПА «Sparus II» (Іспанія)

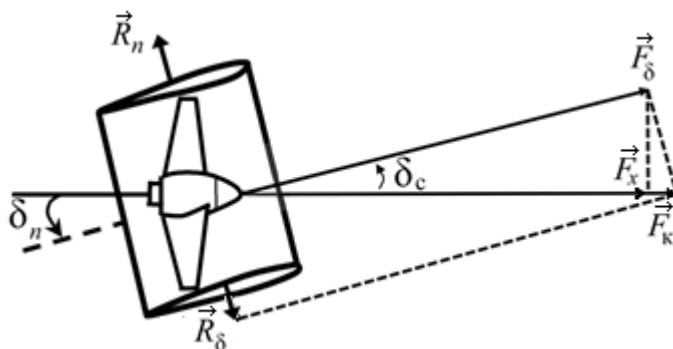


Рис. 2. Схема сил, що створюються РКП під час перекладання насадки

$$Q = Q_p (1 + \sin^2(\theta_n \delta_n)), \quad (5)$$

де  $Q_p$  – момент обертання гвинта у співвісному потоці.

З метою отримання необхідних для роботи регулятора параметрів в роботі проводилось дослідження динаміки АНПА з двома типами РКП: ГГ в напрямній насадці та ГГ в поворотній насадці.

ГГ з напрямною насадкою – один з найбільш поширених типів РКП для АНПА. Поворотна насадка представляє собою підвішене на балері кільцеве крило, всередині якого розміщується ГГ. Вісь балера насадки лежить в площині диска ГГ, чим забезпечується вільний поворот насадки на кут, який зазвичай не перевершує  $\delta = 30\text{--}35^\circ$  [12].

При математичному моделюванні було використано наступні РКП:

- для ГГ у напрямній насадці розглядалась насадка Model PN160-1, яка має коефіцієнт розкриття насадки – 1.32, внутрішній розрахунковий діаметр – 161.6 мм, відносне подовження насадки – 0.80, тип профілю – авіаційно-сегментний; при цьому ГГ мав такі характеристики: діаметр – 160 мм, дискове співвідношення – 0,57, крокове співвідношення – 0.9, тип профілю – авіаційно-сегментний, діаметр маточини – 33.4 мм;

- для ГГ в поворотній насадці розглядалась насадка PN160-2, що відрізняється від PN160-1 внутрішнім розрахунковим діаметром – 170.0 мм, який необхідний для її перекладки; ГГ однотипний з попереднім.

Розглянемо тепер розробку оптимального за швидкістю регулятора швидкості руху АНПА. Оптимальне по швидкодії керування забезпечується подачею на об'єкт максимально припустимого керуючого впливу – додатного та від'ємного, що змінюється за релейним законом. Виходячи з теореми про  $n$  інтервалів [13], в загальному випадку для досягнення оптимальності по швидкодії лінійного об'єкта  $n$ -го порядку процес керування повинен складатися з  $n$  інтервалів, у кожному з яких керуючий вплив по черзі змінюється з максимально додатного на максимальний від'ємний і навпаки.

У випадку з АНПА оптимальне за швидкістю керування при переході з однієї швидкості на іншу забезпечується подачею на об'єкт керуючого сигналу, який складається з трьох інтервалів: максимальне додатне значення  $U_{\max}$  (максимальне значення напруги живлення ГЕД) протягом інтервалу часу від 0 до  $t_1$ , максимальне від'ємне значення –  $U_{\max}$  від моменту  $t_1$  до  $t_2$

і нове усталене значення напруги  $U_{\text{уст}}$ , яке відповідає новому значенню швидкості в усталеному режимі.

Таким чином, в процесі керування необхідно визначати три величини:  $t_1$ ,  $t_2$  і  $U_{\text{уст}}$ . Для визначення  $U_{\text{уст}}$  необхідно провести серію експериментів, в яких на АНПА подається деяке значення керуючого сигналу, і він розганяється до деякої усталеної швидкості. Завдяки інтерполяції (другого ступеня) отриманих значень ( $V_{\text{АНПА}} = f(U)$ ) можна отримати  $U_{\text{уст}}$  для будь-якого значення швидкості.

Розглянемо визначення моментів перемикання  $t_1$  і  $t_2$ . Як показало моделювання, перехід з деякої початкової швидкості  $V_0$  на будь-яку іншу  $V_1$  залежить лише від величини  $t_1$ , оскільки друге перемикання (момент  $t_2$ ) необхідно робити в момент часу, коли закінчується перехідний процес, тобто прискорення дорівнює нулю, і розраховувати його немає потреби [14].

Значення часу  $t_1$  було визначено експериментальним шляхом. Методом комп'ютерного моделювання отримано набір векторів  $(V_0, t_1, V_1)$ , який характеризує залежність кінцевої швидкості від початкової швидкості і часу перемикання. Цю залежність можна апроксимувати у зворотному вигляді й отримати необхідну нам функцію  $t_1 = f(V_0, V_1)$ .

Головна перевага даного методу полягає в тому, що вибірка даних для апроксимації була отримана за допомогою математичної моделі, яка враховує всі основні нелінійності реального об'єкту.

На рис. 3 показано отриману залежність інтервалу  $t_1$  для розгону від нульової швидкості  $V_0 = 0$  до будь-якого значення  $V_1$ .

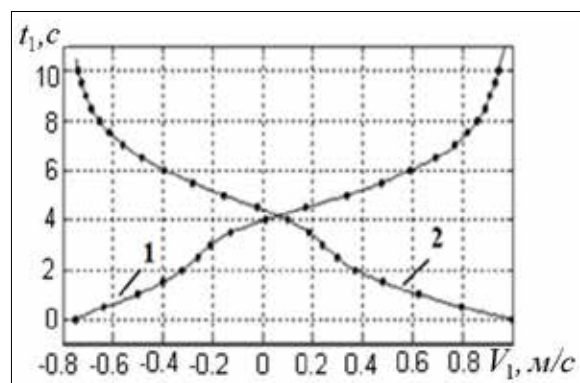


Рис. 3. Залежність часу розгону від кінцевого значення швидкості

Однак, точно апроксимувати повну залежність (розгін від будь-якого довільного початкового зна-

чення до будь-якого кінцевого, тобто функцію від двох змінних), наприклад методом найменших квадратів, досить складно з-за причини істотної нелінійності об'єкту керування. Тому, доцільним в даному випадку є застосування в якості апроксиматора інструментарію штучного інтелекту – багатошарової нейронної мережі зі зворотним поширенням похибки.

На рис. 4 показано експериментальні точки, які зняті за допомогою математичної моделі та які утворюють апроксимаційну поверхню, яку отримано за допомогою нейронної мережі після її навчання [14].

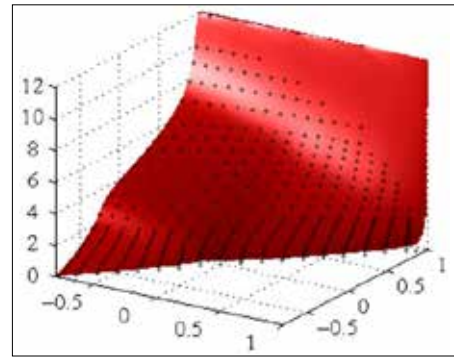


Рис. 4. Залежність часу розгону від початкової та кінцевої швидкості

Для цього була використана штучна нейронна мережа (ШНМ), що складається з двох шарів з чотирма нейронами в прихованому шарі з функцією активації у вигляді тангенціальної сигмоїди.

Структуру системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА з використанням нейрорегулятора  $NN_{рег}$  для ступінчатої зміни керуючого сигналу представлено на рис. 5.

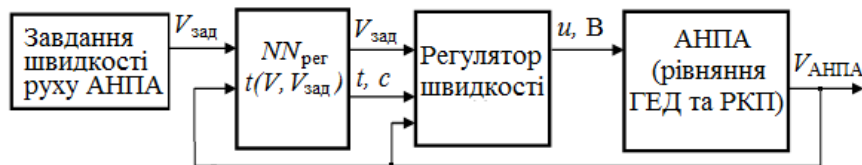
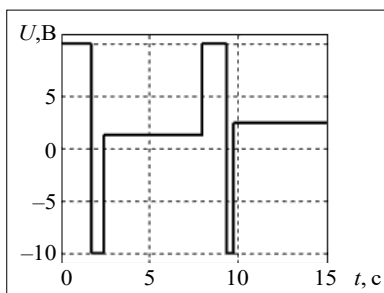
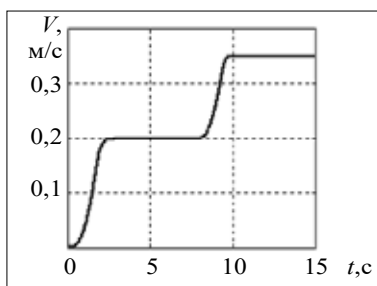


Рис. 5. Структура САК ступінчатою зміною швидкості АНПА з використанням нейрорегулятора

Моделювання руху АНПА з розробленою САК (рис. 6) показало, що регулятор на основі отриманої штучної нейромережі дійсно забезпечує максимальну швидкість та високу точність керування.



а



б

Рис. 6. Перехідний процес в оптимальній системі

**керування:**

а – керуючий сигнал; б – швидкість руху АНПА

На рис. 7 представлена порівняльна характеристика роботи САК рухом АНПА: 1 – без регулятора; 2 – на базі класичного ПД-регулятора; 3 – оптимального за швидкістю регулятора на базі ШНМ.

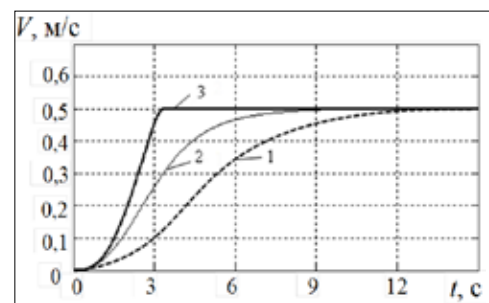


Рис. 7. Швидкість руху АНПА:

Шляхом комп'ютерного моделювання було встановлено, що під час розгону апарата з 0 м/с до 0,5 м/с перехідний процес системи з оптимальним за швидкістю регулятором триває 3,3 с, а той же процес з класичним ПД-регулятором – 9,2 с, тобто у 2,78 рази повільніше.

Розглянемо тепер структуру регулятора швид-

кості АНПА зі стабілізацією упору його РКП. Робота АНПА у маневрових режимах, зазвичай, протікає у косому потоці води, що набігає на РКП. Відомо, що у таких режимах упор РКП суттєво змінюється [15]. Для врахування цієї властивості у роботі засобами математичного

моделювання проведено дослідження гідродинамічних параметрів відповідних РКП, що працюють у косому потоці. Встановлено, що для гребного гвинта в напрямній насадці властиво зростання упору РКП при відхиленні потоку від вісі ГГ, рис. 8.

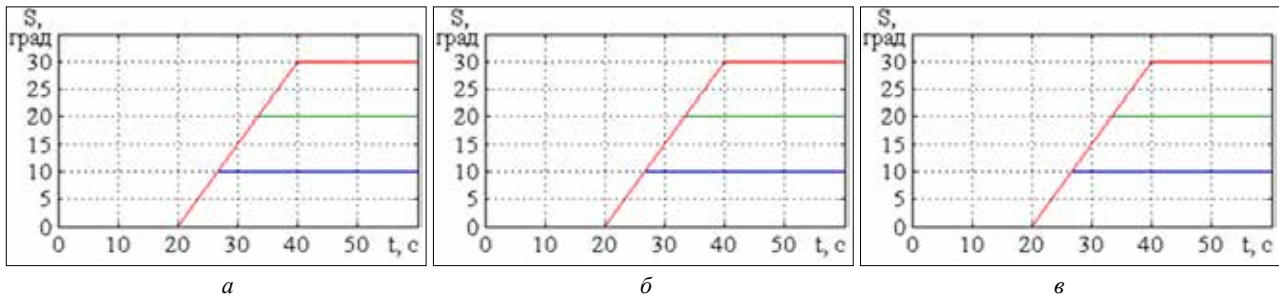


Рис. 8. Дослідження залежності упору РКП від кута набігання потоку:

а – кут набігання потоку на РКП; б – сила упору РКП в косому потоці,  $n = 30$  об/с; в – сила упору РКП в косому потоці,  $n = 60$  об/с

З метою врахування даного відхилення в структурі регулятора швидкістю руху АНПА, проведено детальне дослідження залежності упору гребного гвинта в напрямній насадці від кута набігання потоку в діапазоні кутів від 0 до 30 градусів при різних обертах гребного гвинта. Засобами CFD моделювання отримано вибірку даних, що у векторній формі описує залежність упору РКП від кута та швидкості набігання потоку. У результаті апроксимації цієї вибірки отримано функцію від двох змінних  $F_x = f(\delta, V)$ .

Відомо [12], що головною особливістю РКП з гребним гвинтом у поворотній насадці є залежність коефіцієнту упору РКП від кута перекидки насадки  $\delta$ . На рис. 9 представлено дослідження впливу кута перекидки насадки на упор РКП при заданих обертах ГГ. З представлених графіків видно, що зі збільшенням кута перекидки насадки (рис. 9, а) момент на валу ГГ зростає (рис. 9, б), упор рушійного РКП зменшується (рис. 9, в).

Для визначення закону керування в регуляторі стабілізації швидкості руху АНПА проведено

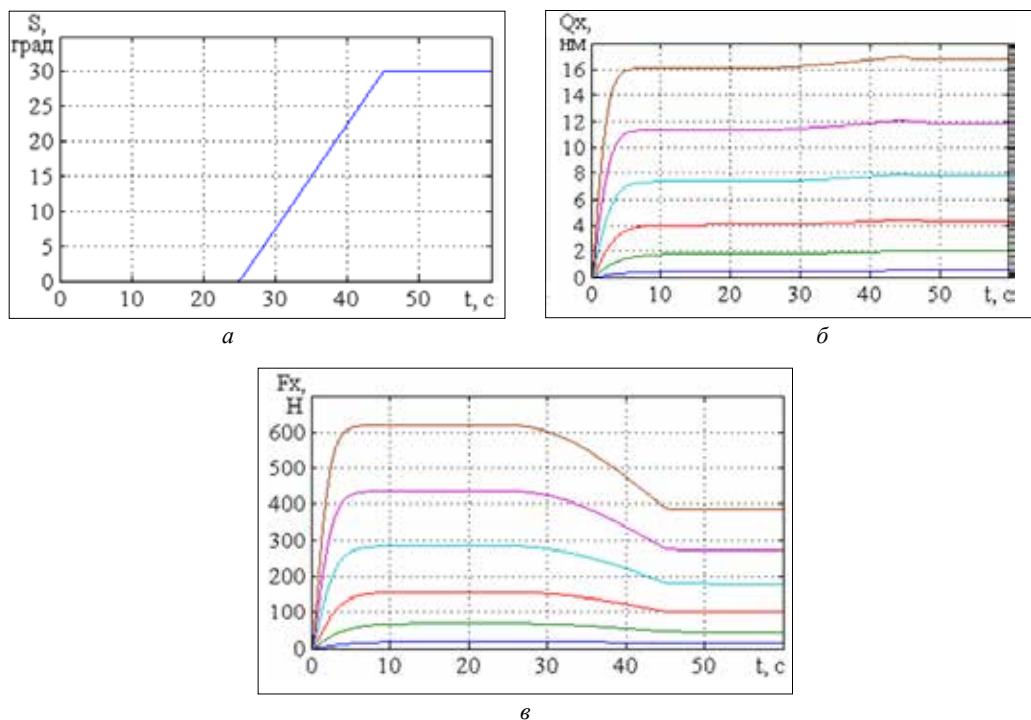


Рис. 9. Дослідження залежності упору РКП від кута перекидки насадки:

а – кут перекидки насадки; б – момент на валу ГГ; в – упор РКП

детальне дослідження залежності упору РКП від кута перекладки насадки. Засобами CFD-модельовання отримано вибірку даних, яка у векторній формі описує залежність упору РКП від кута перекладки насадки та швидкості набігання потоку. Шляхом апроксимації даної вибірки отримано функцію від двох змінних  $F_x = f(\delta^\circ, V)$ .

На рис. 10. представлено діаграму залежності упору РКП від кута повороту насадки  $\delta$  в діапазоні швидкостей  $[0, 2 \dots 1]$  м/с [16].

За отриманими функціями визначено похибку сили упору від кута та швидкості потоку. Далі, регулятор швидкості визначає значення поправки керуючого сигналу відповідно до заданої швидкості та значення похибки.

Побудову регулятора швидкості з уточненим значенням упору РКП пропонується виконати на основі структури, зображеної на рис. 11.

Регулятор побудовано на базі штучної нейронної мережі (ШНМ), оскільки для визначення похибки сили упору необхідно апроксимувати функцію від двох змінних.

В даному випадку ШНМ навчається за функцією, яка відповідає обраному типу РКП. Це може бути «ГГ – руль», «ГГ в поворотній насадці» або «поворотна колонка з ГГ в напрямній насадці». САК швидкістю руху АНПА з ГГ в поворотній насадці складається з оптимального за швидкістю регулятора швидкості АНПА та регулятора стабілізації упору РКП (рис. 12).

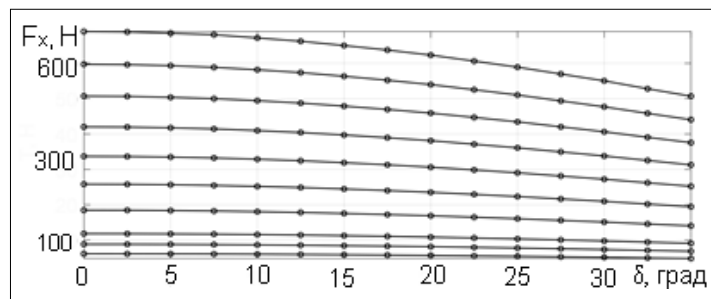


Рис. 10. Упор гребного гвинта в поворотній насадці:  $F_x = f(\delta^\circ, v)$



Рис. 11. Структура регулятора стабілізації упору РКП

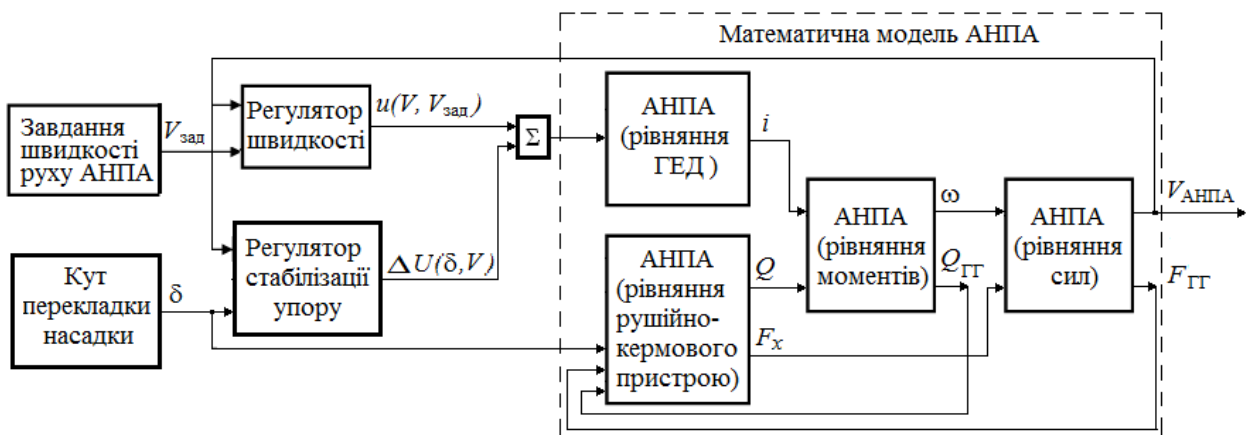


Рис. 12. Структурна схема системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА з стабілізацією упору РКП



Структурна схема містить наступні блоки: блок завдання необхідної швидкості та кута перекидання насадки; оптимальний регулятор швидкості з ШНМ, що визначає час перемикання сигналу для релейного закону керування; регулятор стабілізації упору з застосуванням ШНМ, що визначає похибку для корекції керуючого впливу; математичні моделі АНПА та РКП.

На вхід системи керування надходять дані про задану та поточну швидкості руху АНПА, а також про заданий та поточний кут перекидання насадки. Регулятор швидкості максимально швидко розганяє апарат до заданої оператором швидкості та підтримує її. Коли надходить сигнал про зміну кута перекидання насадки, регулятор стабілізації упору обчислює значення корекції керуючого впливу, рис. 13.

Спочатку АНПА починає розгін від нульової швидкості до 0,8 м/с (графік *a*, до 20-ї секунди).

Регулятор швидкості формує керуючий вплив, який дозволяє досягти заданої швидкості максимально швидко (графік *б*, до 20-ї секунди). При цьому маємо максимальне значення упору (графік *в*, до 20-ї с.). При повороті насадки на кут 30°, упор зменшується і швидкість АНПА починають знижуватись (графіки *в* і *г*, після 20-ї секунди). Регулятор стабілізації упору обчислює величину,

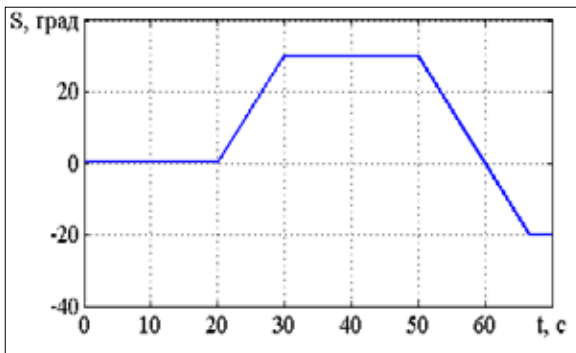
на яку необхідно збільшити керуючий вплив і компенсувати втрачений упор (графік *б*, після 20-ї секунди).

Далі на ділянці з 30 по 50 секунду апарат рухається з постійною швидкістю. Починаючи з 50 секунди кут змінюється на протилежний відносно осі ГГ,  $\delta = -20^\circ$ . При цьому, при зменшенні кута регулятор автоматично перераховує значення сигналу керування (*б*).

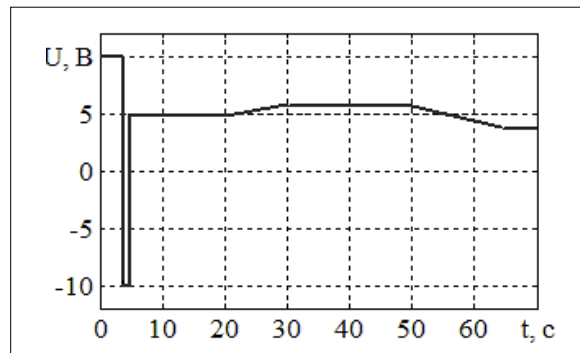
На графіках *в* та *г* представлено порівняльний аналіз упору РКП та швидкості руху АНПА при роботі САК з регулятором стабілізації упору і без регулятора: F1 – упор РКП та швидкість руху АНПА без регулятора упору ( $V_{АНПА} = 0,8$  м/с); F2 – упор РКП і швидкість руху АНПА з регулятором упору; F3 – упор РКП та швидкість руху АНПА при куті повороту насадки  $\delta = 0$ .

В табл. 1 представлено результати моделювання для режимів представлених на рис. 15 режимів роботи РКП.

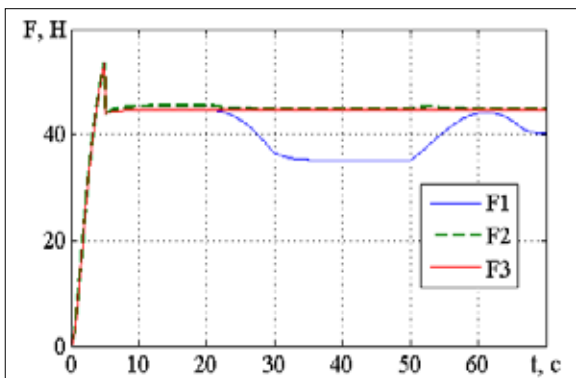
Як видно з графіків, розроблений регулятор якісно компенсує втрату упору РКП при повороті насадки. Перевага розробленого регулятора полягає в тому, що системі не потрібно відпрацьовувати похибку, що призводить до відхилення від траєкторії руху.



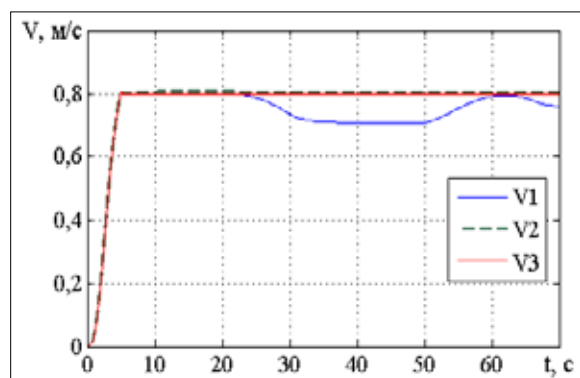
а) кут перекидання насадки



б) сигнал керування



в) упор РКП



г) швидкість руху АНПА

Рис. 13. Результат моделювання роботи оптимального регулятора швидкості з стабілізацією упору РКП

Таблиця 1  
Результати моделювання роботи САК

Кут переключки насадки $\delta$ , град	Швидкість руху $V_{АНПА}$ , м/с	Упор РКП $F_x$ , Н	
		без регулятора	з регулятором
0°	0,8	44,8 (F3)	44,8 (F3)
30°		32,28 (F1)	43,90 (F2)
Різниця, %		27	2
0	3,0	71,01	71,01
30		32,8	69,4
Різниця, %		53,8	2,2

Розроблена САК працює на упередження можливого відхилення, регулятор миттєво корегує значення сигналу керування.

#### Висновки.

Удосконалено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води, що набігає.

Розроблено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА, яка містить оптимальний за швидкодією регулятор швидкості та регулятор стабілізації упору РКП при роботі у косому потоці води.

В структуру регулятора швидкості закладено штучну нейронну мережу для апроксимації нелінійної функції від двох змінних – початкової та

кінцевої швидкості руху АНПА, і визначення моменту перемикання керуючого сигналу.

За результатами моделювання розробленого оптимального за швидкодією регулятора швидкості визначено, що регулятор розганяє апарат без перерегулювання в 2,7 рази швидше, ніж класичний ПД-регулятор.

Розроблену САК удосконалено додаванням регулятора стабілізації упору РКП при роботі в косому потоці води. За результатами гідродинамічних досліджень функціонування гребного гвинта в напрямній та поворотній насадках при різних режимах роботи сформовано базу даних, яка описує функціональну залежність упору рушійно-кермового пристрою від кута та швидкості потоку, що набігає. Таким чином, під час повороту насадки регулятор визначає уточнене значення керуючого сигналу, враховуючи похибку упору РКП.

Шляхом математичного моделювання встановлено, що відхилення упору РКП при куті переключки насадки  $\delta=30^\circ$  залежить від швидкості потоку та може перевищувати 50%. Відхилення упору при роботі САК становить близько 2%. Таке незначне відхилення упору РКП майже не впливає на швидкість руху АНПА. Розроблений регулятор дозволяє компенсувати втрату упору рушійя, без відпрацювання помилки, що підвищує точність роботи системи автоматичного керування швидкості руху АНПА.

#### Список літератури:

1. Chuanfeng Wang, Fumin Zhang, & Dirk Schaefer. Dynamic modeling of an autonomous underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Technology*. 2015. № 20 (2). P. 199–212. DOI: 10.1007/s00773-014-0259-0.
2. Jebelli A., Yagoub MCE, & Dhillon B. S. Modeling of an Autonomous Underwater Robot with Rotating Thrusters. *Advances in Robotics & Automation*. 2017. Vol 6, 162. DOI: 10.4172/2168-9695.1000162
3. Y. Valeriano-Medina A., Martínez L., Hernández H., Sahli Y., Rodríguez, & J. R. Cañizares.. Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2013. № 19(2). P. 175–200. DOI: doi.org/10.1080/13873954.2012.717226.
4. Osama Hassanein Sreenatha, G. Anavatti Hyungbo, & Shim Tapabrata Ray. Model-based adaptive control system for autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*. 2016. Vol 127, P. 58–69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.034
5. Timothy Sands and Kevin Bollino. Autonomous Underwater Vehicle Guidance, Navigation, and Control. 2018. P. 1–30. DOI: 10.5772/intechopen.80316
6. İkbal Eski and Şahin Yildirim.. Control of Autonomous Underwater Vehicles using Neural Network Based Robust Control System. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2016. Vol 1. P. 49–54. URL: https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijme/2016/012-0009.pdf
7. Ivan Masmitja, Julian Gonzalez, Cesar Galarza, Spartacus Gomariz, Jacopo Aguzzi & Joaquin del Rio. New Vectorial Propulsion System and Trajectory Control Designs for Improved AUV Mission Autonomy. *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 4, 1241. P. 1–26. DOI:10.3390/s18041241
8. Блінцов С.В. Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами. Миколаїв : НУК, 2014. 222 с.
9. Справочник по теории корабля: В 3-х т. / под ред. Я.И. Войткунского. Л. : Судостроение: Управление водозмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. 1985. Т. 3. 544 с.

10. Hrudinina H. S. Mathematical modeling of an autonomous uninhabited underwater vehicle dynamics with propeller in the rotary nozzle. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2018. № 2(10). P. 144–153. DOI: 10.15589/SMI. <http://smi.nuos.mk.ua/-archive/2018/2/16.pdf>
11. Бажанкин Ю.В. Математическое моделирование работы винтового движителя при маневрировании судна : автореф. дисс. ... кандидата технических наук : 05.22.19. Нижний Новгород, 2012. 24 с.
12. Юдин Ю.И. Математическое моделирование работы поворотной винтовой колонки бурового судна. *Вестник МГТУ*. 2010. Том 13. № 4/2. С. 845–851.
13. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. Киев: Высшая школа. 1989. 431 с.
14. Блінцов С.В., Грудініна Г.С. Розробка оптимальних за швидкістю систем керування підводним апаратом в умовах невизначеності на базі штучних нейронних мереж. *Вісник НУК*. 2009. № 1. URI: <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/1720>
15. Бражко А.С., Король Ю.М. Исследование взаимодействия движителей с корпусом подводного аппарата при маневрировании. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : НУК, 2013. С. 402–405.
16. V. Blintsov, H. Hrudinina.. Mathematical modeling of autonomous underwater vehicle propulsion and steering complex operation in oblique (beveled) water flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/9 (100). P. 10–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176673

**Blintsov V.S., Hrudinina H.S., Burunina Z.Yu., Nadtochy A.V. IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED CONTROL OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE**

*The structure of the system of automatic speed control of an autonomous underwater vehicle, the propulsion and steering device of which operates in a sloping flow of incoming water, has been improved. To achieve maximum speed when switching from one speed of an autonomous underwater vehicle to any other specified speed, it is proposed to use optimal control with switching control influence according to the relay law. The automatic control system includes a controller that calculates the value and switching time of the control signal in real time. The controller is built on the basis of an artificial neural network, which approximates the function of the switching time from the initial and set speed of the submarine. An artificial neural network training database was obtained by computer experiment using a mathematical model of an autonomous underwater vehicle. To stabilize the speed of the underwater vehicle during shunting movement or during the influence of the current, a regulator has been developed that adjusts the value of the control signal in accordance with the change in the stop of its propulsion and steering device. To establish the dependence of the total thrust of the propulsion and steering device used for autonomous underwater vehicles mini and small class, used experimental data obtained by mathematical modeling of the dynamics of the submarine in the Simulink Matlab system. The study of the hydrodynamic characteristics of the propeller of the propulsion and steering device, located in the guide and swivel nozzles, was carried out by the methods of computational hydrodynamics and using the software package FlowVision CFD. It is established that the deviation of the propulsion and steering device stop at the nozzle transfer angle 30° depends on the flow velocity and can exceed 50 percent. Deviation of an emphasis at work of the automatic control system makes about 2 percent. Such a slight deviation of the stop of the propulsion device almost does not affect the speed of the autonomous underwater vehicle. The developed regulator allows to compensate for the loss of the propulsion stop, without testing the error, which increases the accuracy of the automatic speed control system of autonomous underwater vehicle.*

**Key words:** *autonomous underwater vehicle, propulsion and steering device, automatic control.*

**Вдовичин Т.Я.**

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

**Лазурчак Л.В.**

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

## ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ПОШУКОВИХ СИСТЕМ ЯК ЗАСІБ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Серед величезної кількості інформаційних систем є такі, які призначені для пошуку. Відомо, що інформаційно-пошукові системи володіють організованим набором інструментів, які дозволяють відшукувати дані по запитах користувачів. Для прикладу, пошуковик від Google – найпопулярніша система, яка опрацьовує більше 62% запитів щомісячно від загальної кількості існуючих типових систем та здійснює пошук близько 190 мовами світу. Розробити інформаційно-пошукову систему під конкретні потреби можна, маючи навички програмування. Для цього потрібно пройти етапи аналізу, проектування та реалізації власного проєкту.*

*У статті продемонстровано етапи створення інформаційно-пошукової системи для організації залізничних перевезень. Першочергово, для реалізації поставленого завдання розроблено базу даних засобами MySQL, що забезпечує стабільну роботу з даними. Для проектування інформаційно-пошукової системи обрано клієнт-серверну архітектуру, що мінімізує вимоги до апаратних і програмних засобів клієнтського комп'ютера. Для розробки серверної частини використано мову PHP, для реалізації клієнтської частини інтерфейсу – JavaScript, jQuery, HTML, CSS, що ґрунтуються на технологіях Ajax та підтримуються сучасними популярними браузером. Зокрема, розроблена інформаційно-пошукова система включає календар, що реалізований за допомогою підключеної бібліотеки JavaScript. Наповнений функціонал інформаційно-пошукової системи дозволяє користувачу здійснити якісний пошук для залізничного сполучення по певним критеріям та замовити білети для прокладеного маршруту.*

**Ключові слова:** інформаційно-пошукова система, бази даних, засоби вебпрограмування.

**Постановка проблеми.** Життя сучасної людини неможливо уявити без використання глобальної мережі. Для того, щоб здійснювати повноцінну життєдіяльність у сучасному інформаційному суспільстві, людина використовує джерело чи сховище знань, до якого може звертатись для пошуку різноманітних відповідей на запитання, що знаходяться у вільному доступі в Інтернеті. Використання інформаційного середовища без застосування розвинених пошукових механізмів неможливе. Розумне застосування пошукових систем дозволяє оперативно та достовірно отримати потрібну інформацію. Варто лише згадати потужні функціональні можливості пошукової системи від компанії Google, яка користується шаленим авторитетом уже протягом тривалого часу.

Інформаційні системи теж відіграють важливу роль у різних сферах діяльності людини. Сучасне суспільство зацікавлене у розвитку та ефективності раціонального використання інформаційних систем. Кваліфікований персонал, який обслуговує функціонування даної інформаційної системи

відповідає за своєчасне забезпечення користувачів належною інформацією. Традиційно, інформаційна система включає технічне, програмне та організаційне забезпечення, а також, залежно від сфери її застосування, характеризується своїми функціями, архітектурою, принципами реалізації. Існують декілька аспектів, які є спільними для різних інформаційних систем, а саме: призначення для збору, обробки та запису інформації, що свідчить про те, що основою функціоналу є база даних; орієнтація на кінцевих користувачів, що спрямоване на налаштування простого, легкого та зручного інтерфейсу [1].

У повсякденному житті сучасної людини використання інформаційних систем значно спрощує виконання різних завдань. Для прикладу можна навести банківські системи для взаємодії з клієнтами, спеціалізовані програми для державних установ для зменшення обігу паперової документації, додатки для оплати комунальних послуг для пересічного населення, системи керування роботою побутових приладів для домашнього використання, сервіси для продажу авіаційних

і залізничних квитків для здійснення подорожей, відправлення у відрядження, швидкої доставки потрібного вантажу тощо.

Спільною рисою різноманітних інформаційних систем, що створюються з певною метою, є пошук інформації. Тому важливу роль для пересічного користувача відіграють саме інформаційно-пошукові системи, які дозволяють при пошуку тематичної інформації в якійсь галузі, застосовувати деякі принципи систематизації і класифікації наявних даних.

Інформаційно-пошукова система, яка реалізована програмно, дозволяє зберігати, відшукати та вивести інформацію, яка цікавить користувача. Для фільтрування інформації в таких системах, користувач звертається з інформаційним запитом, що вказує на певну інформаційну потребу. Відшукування потрібної інформації здійснюється в пошуковому масиві, формуванням та оновленням якого займаються розробники чи адміністратори системи.

Розробити інформаційно-пошукову систему можна, виходячи з потреб та побажань конкретного користувача. Звичайно, адміністратор такої системи повинен бути компетентним у галузі програмування для розробки та підтримки управління власного проекту, тобто здатним налаштувати інтерфейс інформаційно-пошукової системи, щоб правильно направляти інформаційні потоки даних для відображення інформації у потрібному вигляді. Як висновок, проектування інформаційно-пошукової системи дозволяє встановити зв'язок між джерелом та отримувачем інформації [5].

Інтернет наповнений різноманітними багатofункціональними інформаційно-пошуковими системами, які створені під потреби користувачів. Зокрема, використовуючи системи управління базами даних та сучасні вебтехнології, маючи навички програмування, можна спроектувати власну інформаційно-пошукову систему, яка буде типовою до аналогічних систем, що містяться у глобальній мережі. Зокрема, для прикладу, можна реалізувати інформаційно-пошукову систему, яка б допомагала користувачу оперативно дістатись місця призначення, використовуючи залізничні сполучення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основи створення інформаційних систем та їх розвиток досліджували Іванов В., Іванов С., Карасюк В. [1], Ситнік Б. [2]. Питання створення та функціонування інформаційних систем розкрито у працях Берези А. [3], Мамиконова А., Мартин Дж. [5] тощо. Проектування інформаційних

систем вивчали Авраменко В., Авраменко А. [4], Шаховська Н. [4], Кузьмін В., Яцишин Т. [6].

**Постановка завдання** – розробка інформаційно-пошукової системи на прикладі організації залізничних перевезень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для реалізації поставленого завдання передбачається розробити базу даних, яка буде доступною в Інтернеті, тому найдоцільніше фізично розмістити її на віддаленому сервері. Очевидно, що найбільш правильною для цього випадку буде клієнт-серверна архітектура, що передбачає мінімізації апаратних і програмних вимог до клієнтського комп'ютера. Вміст інформації у базі даних передбачено досить великим, але при цьому сама структура таблиць та логіка роботи не відрізняється особливою складністю. Важливим у виборі інструменту для бази даних є простота і компактність, що забезпечуватиме швидку і стабільну роботу з даними. У даному дослідженні акцентовано увагу на MySQL, як на найбільш оптимальній і поширеній.

Для розробки серверної частини інформаційно-пошукової системи вибрано мову PHP, яка характеризується простотою освоєння і швидкістю розробки нових програм, а також містить величезну кількість готових класів, шаблонів та інших рішень, доступних за безплатними ліцензіями, що в багатьох випадках підвищує швидкість написання програм для виконання різноманітних завдань.

Для реалізації клієнтської частини інтерфейсу було вибрано стандартні засоби, такі як JavaScript, jQuery, HTML, CSS, оскільки вони добре підходять для реалізації інтерактивних веб-систем на основі Ajax та підтримуються всіма сучасними популярними браузерами. Для роботи з таким інтерфейсом користувачу не потрібно скачувати та встановлювати якісь додаткові програмні засоби чи розширення для браузера. Зокрема, на ER-діаграмі ромбами позначено зв'язки між частинами інформаційно-пошукової системи, а саме: однією лінією – необов'язковий зв'язок, подвійною лінією – обов'язковий зв'язок, цифра 1 – зв'язок «до-одного», літера N – зв'язок «до-багатьох» (рис. 1).

Щоб побудувати концептуальну модель даної задачі, слід прийняти такі твердження:

- між пасажирськими залізничними станціями обов'язково існують сполучення;
- через станції можуть проходити поїзди, які здійснюють перевезення за різними маршрутами;
- станції можуть з'єднуватися за допомогою декількох маршрутів;

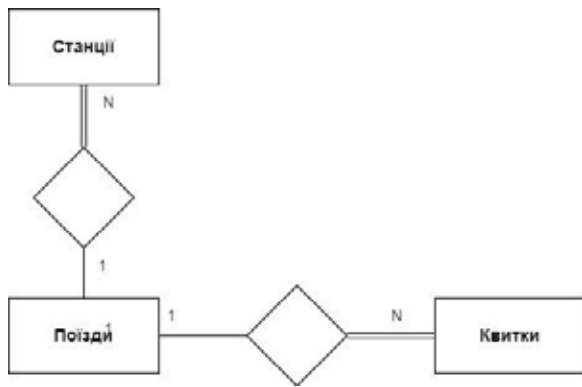


Рис. 1. ER-діаграма інформаційної системи

- потяг заданого маршруту містить задану кількість місць певного типу;
- маршрут характеризується номером, часом відправки та прибуття, кількістю наявних місць кожного із заданих типів.

У розробленій реляційній схемі для інформаційно-пошукової системи (рис. 2) ключові атрибути підкреслено, а місця входу та виходу стрілок показують, за якими атрибутами здійснюються зв'язки.

При проектуванні реляційної бази даних необхідно організувати найбільш ефективну структуру даних, тобто забезпечити швидкий доступ до даних в таблицях, виключити непотрібне повторення даних, яке може стати причиною помилок при введенні та нераціонального використання пам'яті комп'ютера, забезпечити цілісність даних таким чином, щоб при зміні одних об'єктів,

автоматично здійснювалися зміни, пов'язаних з ними об'єктів. Процес зменшення надлишковості інформації в базі даних називається нормалізацією, мета якої – вилучення надлишкових копій даних та забезпечення максимальної гнучкості як в структурах таблиць, так і в інтерфейсах на випадок можливих змін.

Проектування інформаційно-пошукової системи організації залізничних перевезень здійснено, використовуючи прямолінійну ієрархію (рис. 3.).

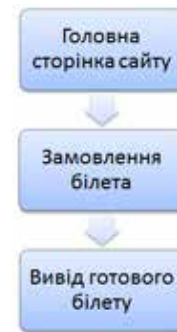


Рис. 3. Діаграма прямолінійної ієрархії

Технічним функціоналом при розробці інформаційно-пошукової системи залізничних перевезень є забезпечення зручного інтерфейсу для користувача, якісного пошуку по заданим критеріям, повідомлення повного обсягу віднайденної інформації користувачу, здійснення замовлення білетів.

Реалізація інформаційно-пошукової системи розпочинається із створення бази даних за допомогою SQL-запитів, які подані на рис. 4–6.

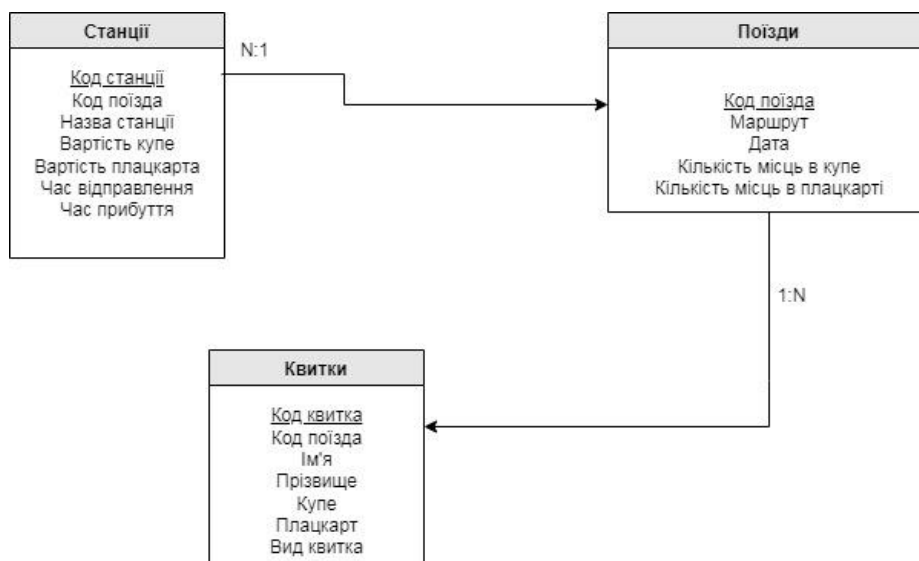


Рис. 2. Реляційна схема інформаційної системи

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `pojizdy` (
  `id` int(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT,
  `marshrut` text NOT NULL,
  `n_p` varchar(50) NOT NULL,
  `data` date NOT NULL,
  `kil_p_m` int(11) NOT NULL,
  `kil_k_m` int(11) NOT NULL,
  PRIMARY KEY (`id`)
) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8 AUTO_INCREMENT=2;
```

Рис. 4. Запити для таблиці «Поїзди»

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `stancij` (
  `id` int(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT,
  `id_p` int(11) NOT NULL,
  `stanciya` varchar(255) NOT NULL,
  `var_k` int(11) NOT NULL,
  `var_p` int(11) NOT NULL,
  `chas_p` varchar(10) NOT NULL,
  `chas_v` varchar(10) NOT NULL,
  PRIMARY KEY (`id`)
) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8 AUTO_INCREMENT=15;
```

Рис. 5. Запити для таблиці «Станції»

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `bilety` (
  `plaskart` tinyint(1) NOT NULL,
  `id` int(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT,
  `Imya` varchar(255) NOT NULL,
  `Prizv` varchar(255) NOT NULL,
  `id_p` int(11) NOT NULL,
  `vyd_bil` varchar(255) NOT NULL,
  `kupe` tinyint(1) NOT NULL,
  PRIMARY KEY (`id`)
) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8 AUTO_INCREMENT=4 ;
```

Рис. 6. Запити для таблиці «Білети»

Візуальне представлення структури виконуваних файлів для серверної та клієнтської частин подано на рис. 7 та 8.

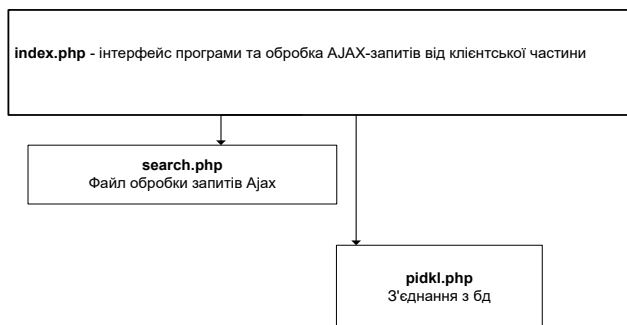


Рис. 7. Серверна частина

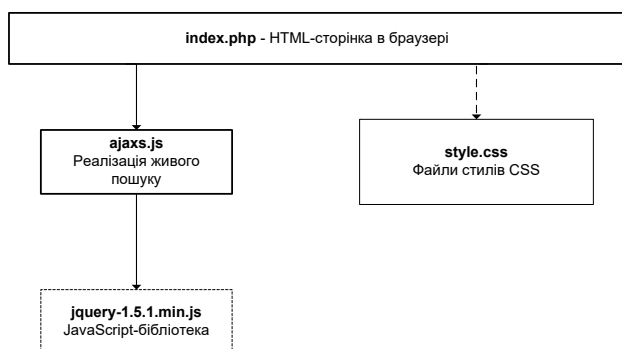


Рис. 8. Клієнтська частина

Розроблена інформаційно-пошукова система являє собою вебсторінку, яку можна відкрити за допомогою будь-якого браузера. Вона досить проста та зручна в використанні. Пошук інформації здійснюється за допомогою введення критеріїв, а саме заповнення полів: «Станція відправлення», «Станція прибуття» та «Дата». При заповненні полів «Станція відправлення» та «Станція прибуття» появляється випадаючий список, який пропонує відповідні станції при введенні критеріїв пошуку (рис. 9).



Рис. 9. Головна сторінка інформаційно-пошукової системи залізничних перевезень

При введенні потрібної дати допомагає вбудованих календар, який реалізований за допомогою підключеної бібліотеки JavaScript. Ввівши всі критерії для здійснення пошуку, створюється таблиця з переліком поїздів, які прямують через задані станції, що містить: № поїзда, маршрут, час відправлення із заданої станції, час прибуття на кінцеву станцію, кількість вільних місць у купе та плацкартних вагонах. Якщо користувач бажає подивитись всі станції, через які прямує поїзд, тоді можна вибрати «№ поїзда», де будуть відображатися всі станції даного маршруту, а вибраний – позначено синім кольором (рис. 10).

Розроблена інформаційно-пошукова система пропонує не тільки пошук поїздів, а й купівлю квитків на певний маршрут (рис. 11).

Заповнивши всі поля форми замовлення квитка і натиснувши кнопку «Замовити», користувач побачить повністю готовий та сформований білет, який він має можливість переслати на електронну адресу, завантажити на мобільний телефон чи роздрукувати для представлення провіднику поїзда.

Отже, розроблена інформаційно-пошукова система для організації залізничних перевезень дозволяє конкретизувати виконані перед нею завдання, зокрема: розробка бази даних, проектування інтерфейсу, реалізація клієнтської частини. При створенні інформаційно-пошукової системи використані AJAX-технології, завдяки чому дана розробка є оптимальною та зручною в користуванні.

Станція	Час прибуття	Час відправлення	Вартість купейного білета	Вартість плацкартного білета
Львів		20:45	0,0	0,0
Красне	21:34	21:36	150,0	100,0
Золочів	21:58	22:00	200,0	150,0
Тернопіль-Пас.	22:57	23:03	250,0	200,0
Підволочиськ	23:53	23:55	300,0	250,0
Волочиськ	00:04	00:06	350,0	300,0
Хмельницький	00:59	01:03	400,0	350,0
Жмеринка-Пас.	02:31	02:51	450,0	400,0
Рахни	03:25	03:27	500,0	450,0

Рис. 10. Список станцій обраного маршруту

Рис. 11. Форма замовлення білета

**Висновок.** Інформаційно-пошукові системи дозволяють оперативно вирішувати поставлені запити від користувачів, для розробника – налаштувати інтерфейс, що ефективно спрямовуватиме потоки даних від джерела до отримувача. Різноманітність інформаційно-пошукових систем можна підлаштувати під потреби конкретних користувачів, а маючи навички вебпрограмування –

самостійно створювати власні типові проекти. Зокрема, розроблена інформаційно-пошукова система залізничних перевезень має достатній функціонал, який притаманний таким системам (наприклад, <https://gd.tickets.ua>, <https://e-kvytok.ua>, <https://booking.uz.gov.ua>, <https://poizd.com.ua> тощо), а саме: пошук по критеріям, замовлення та покупка квитків.

#### Список літератури:

1. Іванов В.Г., Іванов С.М., Карасюк В.В. Сучасні інформаційні системи і технології: конспект лекцій, Харків : Нац. юрид. ун-т ім. Ярослава Мудрого, 2014. 347 с.
2. Ситнік Б.Т. Основи інформаційних систем і технологій : навч. посібник, Харків : УкрДУЗТ, 2019. 175 с.
3. Авраменко В.С., Авраменко А.С. Проектування інформаційних систем: навч. посібник, Черкаси : Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.
4. Шаховська Н.Б., Литвин В.В. Проектування інформаційних систем : навч. посібник. Львів : Магнолія-2006, 2011. 380 с.
5. Сікора, О. В., Вдовичин, Т. Я., Когут, У. П. Технології програмування інформаційних систем. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. № 2. С. 10–17. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.2.2>
6. Кузьмін В.О., Яцишин Т.Я. Проектування та реалізація інформаційно-пошукової системи «Випускник». *Український журнал інформаційних технологій*. 2019, т. 1, № 1. 46–51.
7. Береза А.М. Основи створення інформаційних систем : навч. посібник, Київ : КНЕУ, 2001. 214 с.



**Vdovychyn T.Ya., Lazurchak L.V. DESIGN OF INFORMATION AND SEARCH SYSTEMS  
AS A MEANS OF USING MODERN TECHNOLOGIES**

*Among the huge number of information systems there are those that are designed to search. It is known that information retrieval systems have an organized set of tools that allow you to search for data on user queries. For example, the Google search engine is the most popular system, which processes more than 62% of queries per month from the total number of existing standard systems and searches about 190 languages. You can develop an information retrieval system for specific needs with programming skills. To do this, you need to go through the stages of analysis, design and implementation of your own project.*

*The article demonstrates the stages of creating an information retrieval system for the organization of railway transportation. First of all, to implement this task, a database has been developed using MySQL, which provides stable work with data. A client-server architecture was chosen to design the information retrieval system, which minimizes the requirements for the hardware and software of the client computer. PHP language was used to develop the server part, JavaScript, jQuery, HTML, CSS were used to implement the client part of the interface, based on Ajax technologies and supported by modern popular browsers. In particular, the developed information and search system includes a calendar, which is implemented using the connected JavaScript library. The full functionality of the information retrieval system allows the user to perform a quality search for the railway connection according to certain criteria and order tickets for the route.*

**Key words:** *information retrieval system, databases, webprogramming tools.*

**Волощук В.А.**

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

**Жученко Л.К.**

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

**Коротинський А.П.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

*Сучасні світові тенденції розвитку чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інших галузей промисловості обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих вуглецевих виробів. Виробництво продукції такого класу є у значній мірі ресурсо- та енергозатратним. Саме тому підвищення ефективності даного виробництва є актуальною науково-практичним завданням особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв та їх дефіцитом. Ефективним методом розв'язання задачі енергозбереження у процесі випалювання є створення сучасної системи керування даним процесом. Єдиною альтернативою проведення дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів є метод математичного моделювання. Визначальним технологічним режимом процесу випалювання є тепловий режим. Таким чином, для синтезу системи керування процесом випалювання потрібно дослідити особливості його теплових режимів з точки зору впливу на них різних технологічних змінних процесу.*

*У статті наведені результати дослідження температурних полів печі випалювання вуглецевих виробів. Основну увагу приділено впливу витрати палива та зміни типів завантажених заготовок на розподілення температур як у просторі печі випалювання, так і безпосередньо у заготовках різного діаметра. Показано, що піч випалювання можна умовно розділити на три температурні зони: гарячу, підсклепінчасту та холодну. Як продемонстрували результати дослідження, дані зони практично не змінюють свого розташування у різних режимах роботи. З'ясовано, що температура пересипки в околі заготовок практично не відрізняється від температури самих заготовок, що надає можливість контролювати температури заготовок на усіх етапах процесу випалювання. Найбільш цікавим з практичної точки зору є результати дослідження температурних полів безпосередньо у заготовках. Тут слід звернути увагу на значний перепад температур заготовок у горизонтальному напрямку та суттєвий вплив гарячих зон печі на температури в заготовках.*

*Отримані результати мають бути використані для побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Розроблення такої системи і є предметом подальших досліджень.*

**Ключові слова:** випалювання, вуглецеві заготовки, температурні поля, перепади температур, дослідження температур.

**Постановка проблеми.** У економіці України виробництво вуглецевих виробів відіграє важливу роль, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різних визначальних для країни галузях промисловості, технологічні процеси яких нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Сучасні світові тенденції розвитку чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інших галузей промисловості обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих вуглецевих виробів. Графіт широко використовується як футеровочний матеріал в доменних та феросплавних печах, атомній промисловості, є незамінним в електротермії. Значним споживачем графітованих виробів є алюмінієве виробництво.

Виробництво вуглецевих виробів є у значній мірі ресурсо- та енергозатратним. Саме тому підвищення ефективності даного виробництва є актуальною науково-практичним завданням особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Одним з основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів є процес випалювання вуглецевих заготовок. Даний процес характеризується значною енергоємністю, у зв'язку з чим задача енергозбереження у процесі випалювання є актуальною науково – технічною задачею.

Ефективним методом розв'язання задачі енергозбереження у процесі випалювання є створення сучасної системи керування даним процесом. Побудові системі керування має передувати дослідження процесу випалювання як об'єкту автоматичного керування. Проведення такого дослідження безпосередньо на промисловому обладнанні практично не можливе з ряду причин. По-перше, дослідження передбачає реалізацію різних режимів роботи, що може призвести у кращому випадку до браку продукції, а у гіршому – до аварійної ситуації, що не припустимо. Це означає, що є суттєві обмеження на кількість режимів роботи, які можуть бути реалізовані на практиці, що у значній мірі звужує область дослідження. По – друге, реалізація різних технологічних режимів гарантує виникнення економічних витрат, обумовлених неоптимальністю даних режимів.

У зв'язку з викладеними обставинами єдиною альтернативою проведення дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів є метод математичного моделювання. Визначальним технологічним режимом процесу випалювання є тепловий режим [1–4]. Таким чином, для синтезу системи керування процесом випалювання потрібно дослідити особливості його теплових режимів з точки зору впливу на них різних технологічних змінних процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Із сучасних досліджень теплових режимів процесу випалювання слід виділити роботи Панова Є. М., Карвацького А. Я., Пулинця І. В., Шабалова С. М., Малахова С. О., Коротинського А. П. [1–5].

У роботі [3] основну увагу приділено практичному застосуванню нових наукових результатів. Зокрема, розроблений раціональний режим випалювання вуглеграфітових заготовок, сформульовані пропозиції щодо раціонального розміщення вуглеграфітових заготовок, виконаний аналіз впливу похибок керування теплового режиму печі

випалювання на швидкість та рівномірність нагрівання вуглеграфітових заготовок.

У дослідженні [4] на основі експериментальних та теоретичних досліджень розроблена математична модель фізико – хімічних і теплових процесів випалювання вуглеграфітової продукції. Розроблена методика розрахунку, що дозволяє визначити температуру у вуглеграфітових заготовках для різних режимів випалювання з урахуванням конструктивних особливостей печей. Теоретично обґрунтована можливість створення імпульсної системи згоряння палива для кільцевих печей випалювання при використанні природного газу низького тиску.

З точки зору використання результатів дослідження теплових режимів процесу випалювання вуглецевих виробів для створення системи керування даним процесом найбільш цікавими є результати, отримані у дослідженні [5]. У даній роботі проаналізовано вплив на перебіг процесу змінних, які можуть бути використані для керування процесом випалювання. Основну увагу приділено впливу даних змінних на якість продукції. У результаті проведених досліджень встановлено, що найбільш ефективною керуючою дією є витрати палива на стадії камера «під вогнем».

**Формулювання цілей статті.** Як показали результати дослідження [5] фактично єдиною ефективною керуючою дією тепловими режимами процесу випалювання вуглецевих виробів є витрати палива у камері «під вогнем». У зв'язку з цим у подальших дослідженнях є сенс розглянути саме цю камеру.

Дослідження теплових режимів камери «під вогнем» має на меті створення системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка б забезпечувала потрібні якісні показники продукції у режимі енергозбереження.

До головних питань щодо якості продукції на стадії випалювання віднесемо: 1) усі заготовки повинні бути доведені до потрібного температурного режиму і витримані необхідний час; 2) перепад температур у повздовжувальному напрямку заготовки не повинен перевищувати допустимий рівень для запобігання виникнення тріщин.

У зв'язку з наведеними вище обставинами, **метою даної статті** є дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів для формування відповідей на наступні запитання щодо теплових режимів камери «під вогнем»:

1) де знаходиться область з найвищою та найнижчою температурами, чи мігрують ці області у залежності від завантаження та зміни витрати палива;

2) де знаходиться область з максимальним перепадом температур у повздовжньому напрямку заготовки, чи мігрує ця область;

3) чи суттєво відрізняється температура заготовки від температури пересипки біля неї.

Для дослідження теплових режимів камери «під вогнем» методом математичного моделювання використовується модель, наведена у [1].

Об'єктом дослідження є камера «під вогнем», в яку по чергово завантажені 5 заготовок діаметрами 300 мм та 600 мм.

Прийнято, що початкова температура всіх елементів печі складає 773 К, температура повітря та природного газу – 600 К, швидкість подачі повітря та природного газу – 3 м/с та 1 м/с відповідно, вміст кисню 24%, вміст CH<sub>4</sub>-94%. Тривалість дослідження – 100 годин.

Всі результати проведених досліджень представлені на момент завершення кампанії випалювання вуглецевих виробів. Загальний вигляд температурних полів печі випалювання показані на рис. 1. Отримані результати свідчать, що характер температурних полів касети печі фактично не змінюється при зміні розміру заготовок, що обробляються. Різниця полягає тільки в абсолютних значеннях температур. Так максимальне значення температури при випалюванні заготовок діаметром 300 мм становить 2494 К, а при 600 мм – 2490 К, мінімальне значення температури – відповідно 754 К та 708 К. Максимальний перепад температур по касеті складає відповідно 1740 та 1782 К, що говорить про краще прогрівання касети з заготовками діаметром 300 мм.

З результатів моделювання видно характерні гарячі зони касети печі, а саме підсклепінчаста зона, де акумулюється значна кількість димових газів, зона першої та п'ятої заготовки, що обумовлено особливістю руху димових газів. Результати даного дослідження свідчать про те, що розмір заготовок не впливає на міграцію характерних зон касети.

Аналіз температурних полів касети печі в перерізі (рис. 2) говорить про значний перепад температур у пересипці зверху вниз, та менш значний перепад зліва направо. Максимальна температура пересипки становить 2085 К та 2075 К, а мінімальна – 1106 К та 1077 К для завантаження 300 мм та 600 мм відповідно. Перепад температур таким чином 979 К та 998 К.

Перепад температур у пересипці по вертикалі обумовлений рухом димових газів через димові канали з підсклепінчастої зони.

Найбільш цікавим з практичної точки зору є результати дослідження температурних полів безпосередньо у заготовках (рис. 3). Тут слід звернути увагу на дві обставини: 1) значний перепад температур заготовок у горизонтальному напрямку; 2) суттєвий вплив гарячих зон печі на температури в заготовках.

Вплив витрати палива на температурні поля камери «під вогнем»

Як вказувалось вище, основною керуючою дією процесу випалювання вуглецевих виробів є витрата палива у камері «під вогнем». У зв'язку з цим проведемо нове дослідження з тим самим об'єктом і початковими умовами, зменшивши тільки швидкість подачі палива на 0,95 м/с і відповідно швидкість подачі повітря на 2,85 м/с.

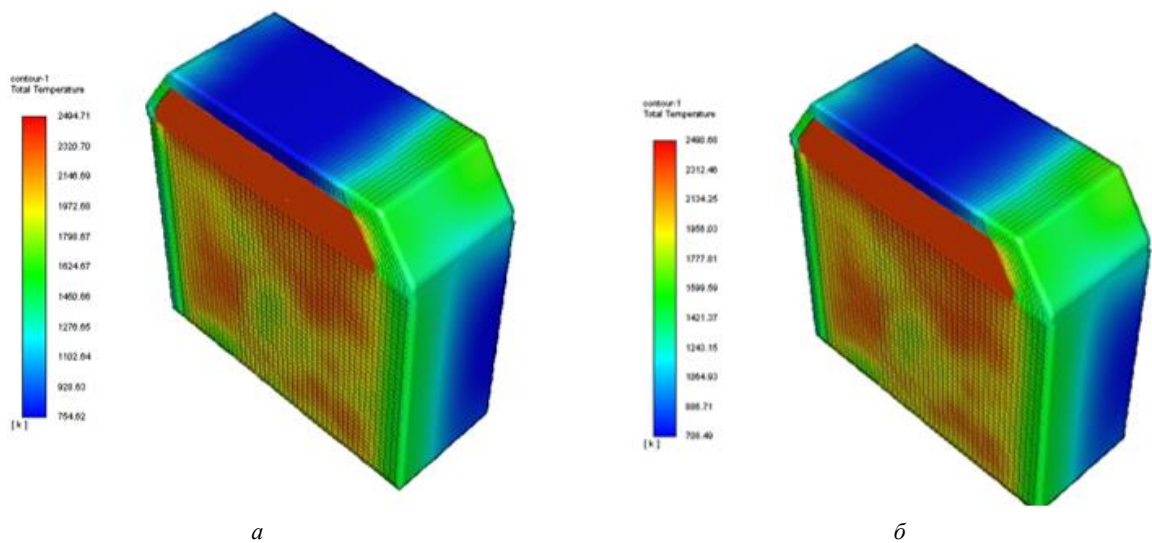


Рис. 1. Температурне поле касети печі випалювання: а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

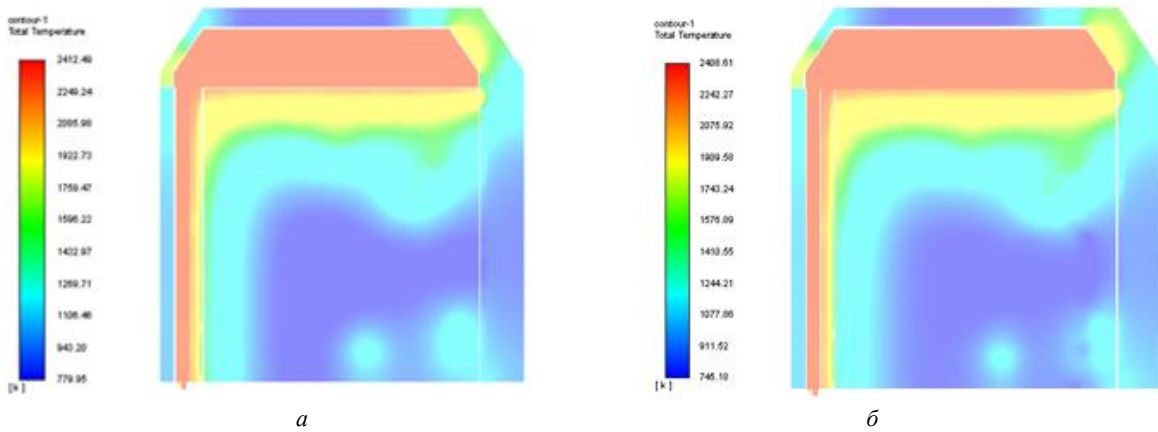


Рис. 2. Температурне поле касети печі в перерізі:  
а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

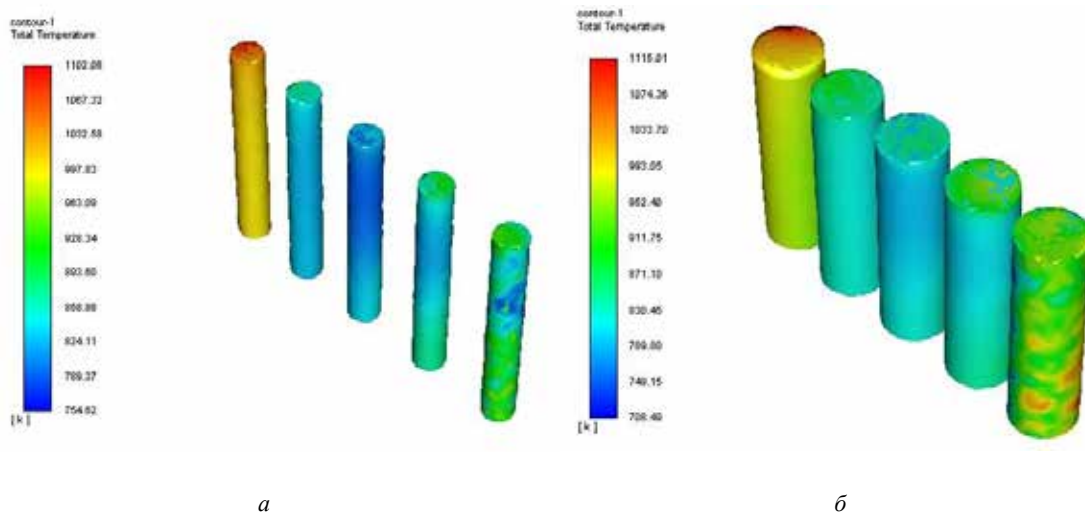


Рис. 3. Температурне поле заготовок наприкінці дослідження

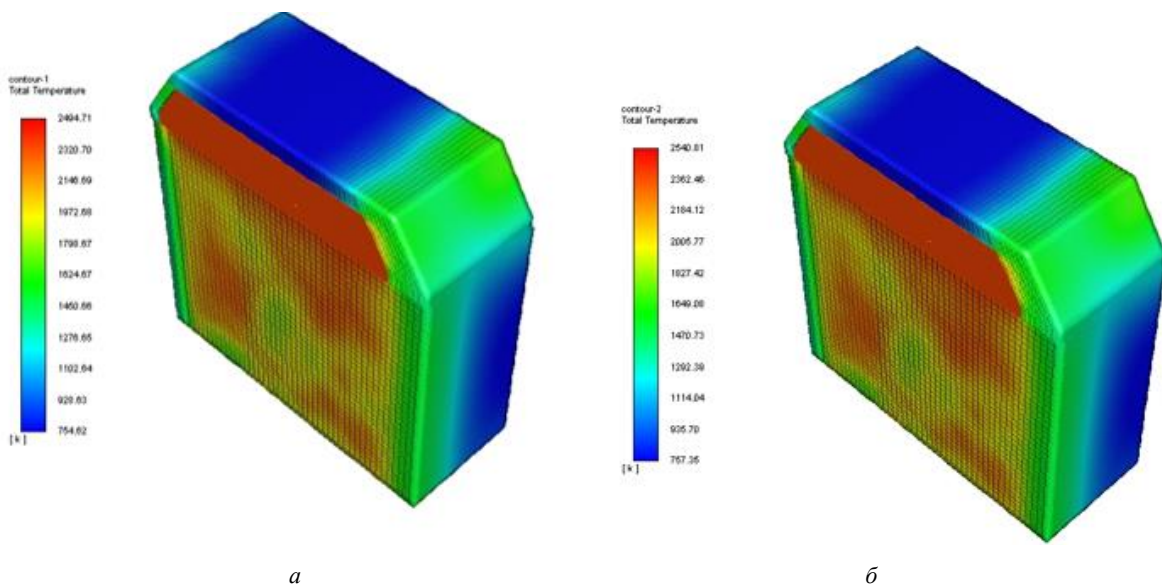


Рис. 4. Температурне поле касети печі випалювання:  
а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

Результати моделювання температурних полів касети печі наприкінці кампанії випалювання вуглецевих виробів представлені на рис. 4. З отриманих результатів видно, що характер температурних полів при зміні витрати палива фактично не змінився. Змінилися тільки абсолютні значення температур. Максимальне значення температури при випалюванні заготовок діаметром 300мм становить 2494 К та 2540 К для заготовок діаметром 600мм; мінімальні значення температур – відповідно 754 К та 757 К. Максимальний перепад по касеті – відповідно 1740 К та 1783 К.

Характерні зони касети печі практично не змінили свого розташування, що дозволяє зробити висновок про відсутність їх міграції при зміні витрати палива. Розташування характерних зон показано на рис. 5.

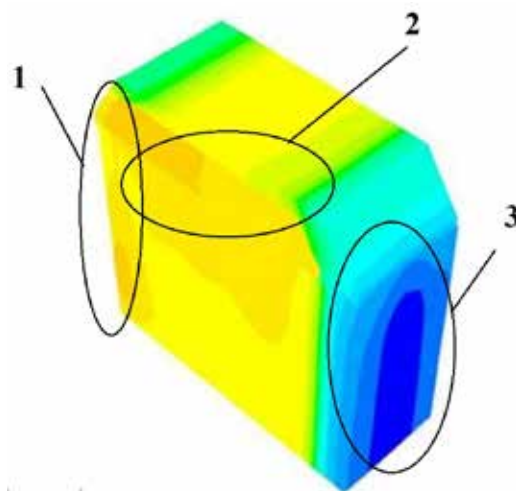


Рис. 5. Характерні температурні зони печі випалювання

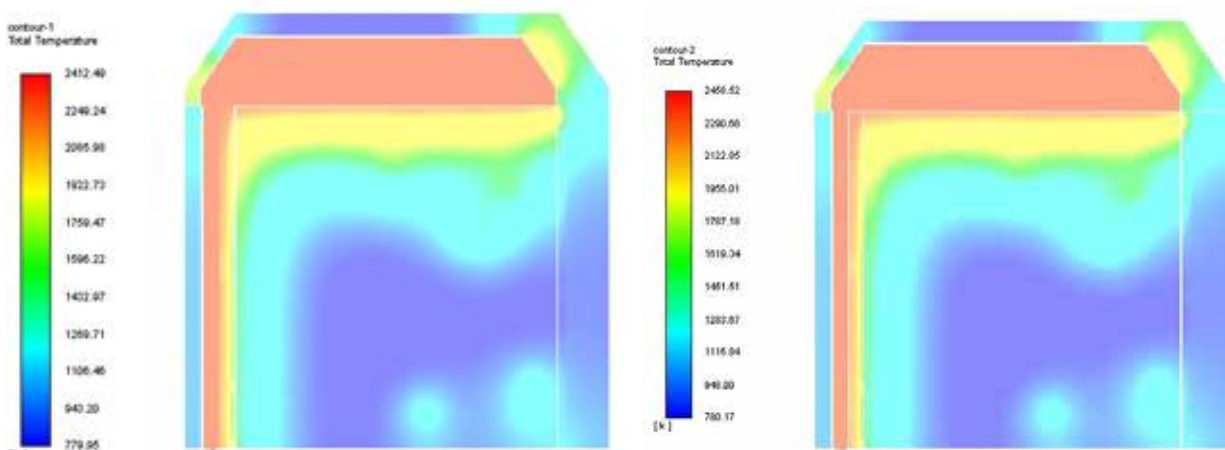


Рис. 6. Температурне поле касети печі в перерізі

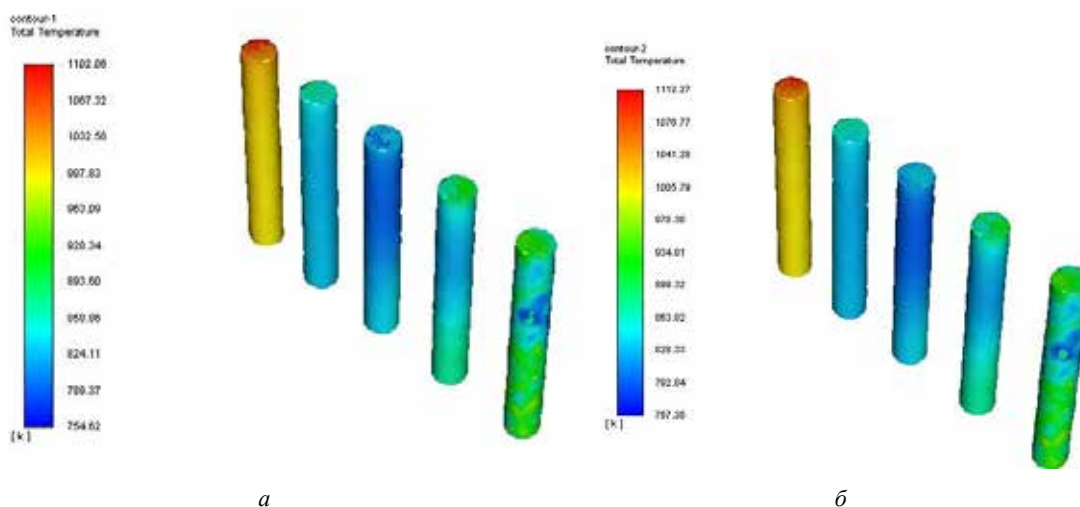


Рис. 7. Температурне поле заготовок наприкінці дослідження: а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

Зона 1 – «гаряча зона» печі – зона, де температура досягає максимуму. Наявність цієї зони обумовлена розташуванням тут газового каналу, де відбувається горіння. Зона 2 – «підсклепінчаста зона» печі розташована під склепінням печі, де завжди знаходиться велика кількість гарячих димових газів. Зона 3 – «холодна зона» печі.

Характер розподілення температури по пересипці зображено на рис 6, де наведено температурне поле касети печі в перерізі. З рис. 6 видно, що так само, як і у попередньому дослідженні, прослідковується значний перепад температур зверху вниз, та менш значний перепад зліва направо. Максимальна температура складає 2085 та 2122 К, мінімальна – 1106 та 1115 К при випалюванні заготовок 300 мм та 600 мм відповідно. Перепад температур становить 979 та 1007 К.

Як свідчать результати моделювання розподілення температур безпосередньо у заготовках, представлені на рис. 7, найбільш нагрітою заготовкою залишається заготовка, найближча до «гарячої зони» печі, заготовка з найменшою температурою – заготовка біля «холодної зони».

#### Висновки

Результати проведеного дослідження свідчать про те, що зміна витрати палива суттєво впливає на розподілення температур і перепадів темпера-

тур в усьому просторі печі випалювання, у тому числі безпосередньо у заготовках. Найбільші зміни температур при зміні витрати палива відбуваються у «гарячій зоні» печі, а значить, і у заготовках, які розташовані у цій зоні. Це вимагає особливої уваги до цієї зони з метою запобігання випуску бракованої продукції.

За результатами дослідження піч випалювання з точки зору розподілення температур можна поділити на 3 зони: «гарячу», «підсклепінчасту» та «холодну». Ці зони не змінюють свого розташування при зміні витрати палива та при завантаженні печі заготовками різних діаметрів.

Заготовки, розташовані у «холодній зоні» печі мають найнижчу температуру на протязі всього процесу випалювання. Тому саме на ці заготовки треба орієнтуватися при визначенні тривалості процесу випалювання.

Як показали результати дослідження, температура пересипки в околі заготовок практично не відрізняється від температури самих заготовок, що дозволяє здійснювати контроль температури останніх.

Отримані результати мають бути використані для побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Розроблення такої системи і є предметом подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеродистых изделий : монография / И.В. Пулинец [и др.] ; Мин-во образования и науки Украины, НТУУ «КПИ». Киев : НТУУ «КПИ», 2014. 175 с.
2. Карвацький А. Я. Теплоелектричний та механічний стан високотемпературних енергоємних промислових агрегатів : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв» / А. Я. Карвацький. К., 2010. 40 с.
3. Шибалов С. Н. Совершенствование тепловых процессов с целью повышения качества обжига заготовок из углеродистых материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. Н. Шибалов. М., 2004. 30 с.
4. Малахов С. А. Совершенствование технологии обжига углеродистой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. А. Малахов. Владикавказ, 2004. 30 с.
5. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатоканальними печами випалювання вуглецевих виробів : дис. ... докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / А. П. Коротинський. К., 2020. 190 с.

#### Voloshchuk V.A., Zhuchenko L.K., Korotynskiy A.P. RESEARCH OF THERMAL REGIMES OF THE PROCESS OF BURNING OF CARBON PRODUCTS

*Modern world trends in the development of ferrous and nonferrous metallurgy, mechanical engineering, chemical industry and other industries cause a constant increase in the production of graphitized carbon products. The production of products of this class is resource- and energy-consuming to a large extent. That is why increasing the efficiency of this production is an urgent scientific and practical task, especially in modern conditions of constant growth in the cost of energy carriers and their shortage. An effective method of solving the problem of energy saving in the firing process is the creation of a modern control system for this process. The only alternative to researching the process of burning carbon products is the method of mathematical modeling. The defining technological mode of the firing process is the thermal mode. Thus, for the synthesis of the control system of the firing process, it is necessary to investigate the peculiarities of its thermal regimes*

*from the point of view of the impact on them of various technological variables of the process. The article presents the results of the study of the temperature fields of the furnace for burning carbon products. The main attention is paid to the influence of fuel consumption and changes in the types of loaded workpieces on the temperature distribution both in the space of the kiln and directly in the workpieces of different diameters. It is shown that the firing furnace can be divided into three temperature zones: hot, sub-vault and cold. As the results of the study showed, these zones practically do not change their location in different modes of operation. It was found that the pouring temperature in the vicinity of the workpieces does not differ from the temperature of the workpieces themselves, which makes it possible to control the temperature of the workpieces at all stages of the burning process. The most interesting from a practical point of view are the results of the study of temperature fields directly in the workpieces. Here, attention should be paid to the significant temperature difference of the workpieces in the horizontal direction and the significant influence of the hot zones of the furnace on the temperatures in the workpieces.*

*The obtained results should be used to build a control system for the firing of carbon products. The development of such a system is the subject of further research.*

**Key words:** *firing, carbon blanks, temperature fields, temperature differences.*



**Говорущенко Т.О.**

Хмельницький національний університет

**Гнатчук Є.Г.**

Хмельницький національний університет

## ПРАВИЛА ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО НЕОБХІДНОСТІ ТА МОЖЛИВОСТІ ВАКЦИНАЦІЇ ВІД COVID'19

*Проведений огляд відомих рішень для підтримки прийняття рішення про вакцинацію від Covid'19 показав, що при чималій кількості різних рішень, запропонованих у 2021–2022 роках, система підтримки прийняття рішень щодо необхідності вакцинації від Covid'19 не розроблена на сьогодні, а наявні рішення не можуть бути використані для отримання висновку про необхідність та можливість вакцинації від Covid'19.*

*Проведений аналіз цивільно-правових підстав щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 в Україні дав можливість визначити категорії працівників, які підлягають обов'язковій вакцинації, а також перелік медичних протипоказань та застережень, за якими надаються протипоказання до вакцинації проти Covid'19.*

*Розроблений метод підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням правових підстав забезпечує: висновок щодо обов'язковості або необов'язковості (але бажаності) вакцинації від Covid'19 – в залежності від професії та місця роботи пацієнта; висновок щодо можливості або протипоказань до вакцинації від Covid'19 – в залежності від наявних захворювань та актуального стану здоров'я пацієнта; висновок про тип протипоказання та його тривалість – в разі висновку про протипоказання до вакцинації від Covid'19.*

*Розроблений метод є теоретичним підґрунтям для майбутньої системи підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням правових підстав, яка надаватиме висновок щодо обов'язковості або необов'язковості з точки зору професії та місця роботи (але бажаності) вакцинації від Covid'19; висновок щодо можливості або протипоказань до вакцинації від Covid'19; висновок про тип протипоказання та його тривалість, завдяки чому система буде корисною для пацієнтів, які, відповівши на питання системи, отримають висновок щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 їх або їх родичів, а також для сімейних лікарів, на яких зменшиться навантаження щодо консультацій пацієнтів та яким стане легше відповідати на питання щодо необхідності та можливості вакцинації, оскільки вже не потрібно буде знати всі діючі законодавчі акти та цивільно-правові підстави.*

**Ключові слова:** вакцинація від Covid'19, прийняття рішення, метод підтримки прийняття рішення щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 на основі правових підстав.

**Постановка проблеми.** На сьогодні складним та неоднозначним як для пацієнтів, так часто і для лікарів залишається процес прийняття рішень в галузі медицини (охорони здоров'я) [1]. Полегшити процес прийняття рішень в галузі медицини (охорони здоров'я) та разом із тим підвищити продуктивність роботи лікарів можуть системи підтримки прийняття рішень, які є ефективними інструментами в епоху доказової медицини та здатні забезпечити лікарів необхідною інформацією, в тому числі про новітні медичні ресурси та про цивільно-правові підстави, що стосуються того чи іншого рішення [1].

Наразі медицина всього світу має серйозний виклик у вигляді пандемії Covid'19. За умови

стрімкого поширення пандемії гострої респіраторної інфекції Covid'19, що викликається коронавірусом SARS-CoV-2, критично важливим інструментом для стримування пандемії у поєднанні з ефективним тестуванням та застережними заходами є вакцинація проти Covid'19.

Зараз 61,9% населення світу отримали принаймні одну дозу вакцини Covid'19. Проте у країнах з низьким рівнем доходу лише 10,6% людей отримали хоча б одну дозу вакцини [2].

Наразі в людини при прийнятті рішення про необхідність чи можливість вакцинації від Covid'19 виникає багато запитань: чи підпадає вона під обов'язкову вакцинацію (в зв'язку з її професією та місцем роботи), чи можна їй вакцинуватись

(враховуючи наявні захворювання та актуальний стан здоров'я). Звісно, що для цього людині необхідно вивчити цивільно-правові підстави вакцинації, що застосовуються в її країні. Людина може сама вивчити всі законодавчі акти, пов'язані з вакцинацією від Covid'19, але найчастіше з такими питаннями люди звертаються до своїх сімейних лікарів, які і так перевантажені під час пандемії і також не завжди володіють цивільно-правовими підставами щодо необхідності чи можливості вакцинації. Таку проблему могла б вирішити Covid'19 система підтримки прийняття рішень щодо необхідності вакцинації від Covid'19, реалізована у вигляді веб-орієнтованого додатку, доступного 24/7, без будь-якої реєстрації. Така система буде корисною для пацієнтів, які, відповівши на питання системи, отримають висновок щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 їх або їх родичів, враховуючи наявні цивільно-правові підстави, що сприятиме подальшому самостійному прийняттю рішень (без звернення до сімейних лікарів). Крім цього, така система буде корисною і для сімейних лікарів, на яких зменшиться навантаження щодо консультацій пацієнтів стосовно необхідності та можливості вакцинації, а також яким стане легше відповідати на питання щодо вакцинації тим пацієнтам, які все ж потребують консультації сімейного лікаря (наприклад, старші люди, які не вміють користуватись Інтернетом та веб-орієнтованими додатками), оскільки лікарям вже не потрібно буде знати всі законодавчі акти та цивільно-правові підстави, а достатньо буде відповісти на питання системи зі слів пацієнта із врахуванням його анамнезу і отримати висновок про необхідність та можливість вакцинації від Covid'19. Звісно, що пропонується система передбачає правдиві відповіді користувачів.

Отже, мотивація до прийняття самостійного рішення пацієнтами щодо вакцинації від Covid'19 та полегшення роботи сімейних лікарів з консультування відносно вакцинації від Covid'19 шляхом розроблення системи підтримки прийняття рішень щодо необхідності вакцинації від Covid'19 наразі є *актуальною проблемою*.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведемо огляд відомих рішень для підтримки прийняття рішення про вакцинацію від Covid'19.

Робота [3] мала на меті розробку цифрової платформи для спілкування вчених із населенням та використання цієї цифрової платформи для пілотного дослідження факторів, пов'язаних із готовністю до вакцинації від Covid'19. Для дослідження готовності до вакцинації було ство-

рено кілька моделей логістичної регресії, скооригованих на особисті коваріації, фактори, що впливають на мотивацію до вакцинації та ризик зараження/важкого захворювання. Цифрова платформа може допомогти створити діалог на основі даних щодо готовності до вакцинації, відкрити науково обґрунтовану дискусію між державними органами та населенням.

Стаття [4] пропонує інформацію про прийняття рішень, пов'язаних із застосуванням вакцини від Covid'19, враховуючи важливість вакцинальної грамотності, довіри та соціальної відповідальності в цьому процесі.

У роботі [5] система підтримки прийняття рішень пропонується як інструмент епідеміологічного прогнозування, враховуючи тенденції Covid'19 у кількох країнах і регіонах, хмари великих даних щодо важливих геофізичних та соціально-екологічних характеристик та очікуваного потенціалу медичної служби, включаючи вакцинацію та обмеження міграції населення як всередині країни, так і між країнами. Розроблена система підтримки прийняття рішень допомагає передбачити наслідки Covid'19 залежно від стратегій захисту від Covid'19, включаючи вакцинацію.

Автори [6] показали, що фармацевти та інші медичні працівники можуть використовувати мотиваційне інтерв'ю, щоб дати можливість людям приймати обґрунтовані рішення щодо вакцин від Covid'19 з метою зменшення вагань щодо вакцинації.

Основною метою дослідження [7] було синтезувати керовану даними модель для прогнозування готовності студентів до вакцинації від Covid'19 за допомогою дерева рішень та регресійного аналізу. Запропонована концептуальна модель була розроблена та перевірена за допомогою машинного навчання для виявлення факторів, пов'язаних з бажанням студентів отримати вакцину від Covid'19.

**Метою дослідження [8]** є визначення змінних, що впливають на ймовірність відмови та нерішучості щодо вакцини від Covid'19, а також визначення прийнятності вакцини для різних сценаріїв ефективності та побічних ефектів. Проведений аналіз гіпотетичних сценаріїв вакцин показав, що люди віддають перевагу менш ризикованим вакцинам з точки зору меншої кількості побічних ефектів, а не ефективності.

Інструмент підтримки прийняття рішень SARACITI [9] був розроблений, щоб структурувати та документувати заснований на доказах, специфічний для контексту процес визначення

пріоритетів або вибору з кількох продуктів, послуг або стратегій вакцинації від Covid'19.

**Постановка завдання.** Проведений огляд відомих рішень для підтримки прийняття рішення про вакцинацію від Covid'19 показав, що при чималій кількості різних рішень, запропонованих у 2021-2022 роках, система підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 не розроблена на сьогодні, а наявні рішення не можуть бути використані для отримання висновку про необхідність та можливість вакцинації від Covid'19. Така система, як і будь-яка класична система підтримки прийняття рішень, повинна складатись з базових елементів (на основі аналізу предметної галузі), правил та методів, які використовуються для обробки інформації. Тоді, для майбутнього розроблення системи підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 на основі цивільного законодавства слід провести аналіз предметної галузі для виявлення цивільно-правових підстав щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 та розробити правила і метод підтримки прийняття рішення щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19, що і є *метою даного дослідження*.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо особливості цивільно-правового регулювання щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 в Україні, оскільки система підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 розроблятиметься наразі саме з врахуванням тільки українського законодавства.

Міністерство охорони здоров'я України своїм наказом від 04.10.2021 № 2153, зареєстрованим у Міністерстві юстиції 16.12.2021 року за № 1624/37246, розширило перелік організацій, представники яких підлягають обов'язковим профілактичним щепленням проти Covid'19. Обов'язковим профілактичним щепленням проти гострої респіраторної хвороби Covid'19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2, на період дії карантину, встановленого Кабінетом Міністрів України з метою запобігання поширенню на території України гострої респіраторної хвороби Covid'19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2, підлягають працівники:

- 1) центральних органів виконавчої влади та їхніх територіальних органів;
- 2) місцевих державних адміністрацій та їхніх структурних підрозділів;

- 3) закладів вищої, післядипломної, фахової передвищої, професійної (професійно-технічної), загальної середньої, у тому числі спеціальних, дошкільної, позашкільної освіти, закладів спеціалізованої освіти та наукових установ незалежно від типу та форми власності;

- 4) органів місцевого самоврядування;

- 5) закладів охорони здоров'я державної та комунальної форми власності;

- 6) комунальних підприємств, установ та організацій.

Перелік медичних протипоказань та застережень, за якими надаються протипоказання до вакцинації проти Covid'19, встановлені відповідними Наказами МОЗ України:

- 1) гостра хвороба з підвищенням температури понад 38,0 °C – тимчасові протипоказання (до 2-х тижнів від початку хвороби);

- 2) Covid'19 в анамнезі (0 доз в анамнезі) – тимчасові протипоказання (до 3-х місяців від часу перебігу Covid'19);

- 3) Covid'19 в анамнезі (1 доза в анамнезі) – тимчасові протипоказання (до 3-х місяців від часу перебігу Covid'19);

- 4) лікування моноклональними антитілами або реконвалесцентною плазмою – тимчасові протипоказання (3 місяці);

- 5) вагітність – тимчасові протипоказання (протягом вагітності) і лише для вакцин, що вказують на вагітність як протипоказання (протипоказано введення живих вакцин, вакцини CoronaVac/Sinovac Biotech);

- 6) лактація – тимчасові протипоказання (протягом лактації) і лише для вакцин, що вказують на лактацію як протипоказання (протипоказано введення вакцини CoronaVac/Sinovac Biotech);

- 7) введення вакцин проти інших інфекційних хвороб – тимчасові протипоказання (14 днів);

- 8) проба з туберкуліном або аналіз крові вивільнення інтерферону-γ (IGRA) – тимчасові протипоказання (до оцінки проби/IGRA);

- 9) супутні захворювання (наприклад, хронічна (стабільна і контрольована) інфекція вірусом імунодефіциту людини (ВІЛ), вірусом гепатиту С і вірусом гепатиту В) – тимчасові протипоказання (на підставі рівня імуносупресії);

- 10) тромбоз та/або тромбоцитопенію – постійні протипоказання для вакцин на векторній основі (AstraZeneca);

- 11) міокардит та/або перикардит – постійні протипоказання для мРНК вакцин (Pfizer/BioNTech);

- 12) онкопатологія – вакцинація з пересторогою (при алогенній або аутогенній трансплантації

або клітинній терапії – не раніше ніж через 3 місяці після таких процедур; перебування на курсі інтенсивної цитотоксичної хіміотерапії – відтермінувати вакцинацію до відновлення абсолютної кількості нейтрофілів; в інших випадках – вакцинація можлива в будь-який час);

13) особи з імунодефіцитом – вакцинація з пересторогою (протипоказано введення живих вакцин);

14) алергічна реакція в анамнезі (анафілактична реакція на попередню дозу вакцини, анафілактична реакція до компонентів вакцини) – постійні протипоказання (для конкретних вакцин);

15) аутоімунні стани – вакцинація з пересторогою.

Враховуючи вищевикладені цивільно-правові підстави щодо необхідності (категорії працівників) та можливості (існуючі медичні протипоказання та застереження) вакцинації від Covid'19, розробимо правила для прийняття рішення щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19.

*Правила для прийняття рішення щодо необхідності вакцинації від Covid'19:*

1) якщо особа є працівником центральних органів виконавчої влади та їхніх територіальних органів, то  $n[1]=1$ , інакше  $n[1]=0$ ;

2) якщо особа є працівником місцевих державних адміністрацій та їхніх структурних підрозділів, то  $n[2]=1$ , інакше  $n[2]=0$ ;

3) якщо особа є працівником закладів вищої, післядипломної, фахової передвищої, професійної (професійно-технічної), загальної середньої, у тому числі спеціальних, дошкільної, позашкільної освіти, закладів спеціалізованої освіти та наукових установ незалежно від типу та форми власності, то  $n[3]=1$ , інакше  $n[3]=0$ ;

4) якщо особа є працівником органів місцевого самоврядування, то  $n[4]=1$ , інакше  $n[4]=0$ ;

5) якщо особа є працівником закладів охорони здоров'я державної та комунальної форми власності, то  $n[5]=1$ , інакше  $n[5]=0$ ;

6) якщо особа є працівником комунальних підприємств, установ та організацій, то  $n[6]=1$ , інакше  $n[6]=0$ .

*Правила для прийняття рішення щодо можливості вакцинації від Covid'19:*

1) якщо особа має наразі гостру хворобу з підвищенням температури понад  $38,0^{\circ}\text{C}$ , то  $p[1,1]=1$ , інакше  $p[1,1]=0$ ;

2) якщо особа має Covid'19 в анамнезі, то  $p[2,1]=1$ , інакше  $p[2,1]=0$ ;

3) якщо особа проходить або проходила лікування моноклональними антитілами або реконвалесцентною плазмою, то  $p[3,1]=1$ , інакше  $p[3,1]=0$ ;

4) якщо особа вагітна, то  $p[4,1]=1$ , інакше  $p[4,1]=0$ ;

5) якщо особа перебуває в періоді лактації, то  $p[5,1]=1$ , інакше  $p[5,1]=0$ ;

6) якщо особі було введено вакцини проти інших інфекційних хвороб, то  $p[6,1]=1$ , інакше  $p[6,1]=0$ ;

7) якщо особі виконано пробу з туберкульном або аналіз крові вивільнення інтерферону- $\gamma$  (IGRA), то  $p[7,1]=1$ , інакше  $p[7,1]=0$ ;

8) якщо особа має вірус імунодефіциту людини (ВІЛ) або якщо особа має вірус гепатиту С або якщо особа має вірус гепатиту В, то  $p[8,1]=1$ , інакше  $p[8,1]=0$ ;

9) якщо особа має тромбоз та/або тромбоцитопенію, то  $p[9,1]=1$ , інакше  $p[9,1]=0$ ;

10) якщо особа має міокардит та/або перикардит, то  $p[10,1]=1$ , інакше  $p[10,1]=0$ ;

11) якщо особа має онкопатологію та підлягала аlogenній або аутогенній трансплантації або клітинній терапії, то  $p[11,1]=1$ , інакше  $p[11,1]=0$ ;

12) якщо особа має онкопатологію та перебуває на курсі інтенсивної цитотоксичної хіміотерапії, то  $p[12,1]=1$ , інакше  $p[12,1]=0$ ;

13) якщо особа має імунодефіцит, то  $p[13,1]=1$ , інакше  $p[13,1]=0$ ;

14) якщо особа має алергічну реакцію в анамнезі (анафілактичну реакцію на попередню дозу вакцини та/або анафілактичну реакцію до компонентів вакцини), то  $p[14,1]=1$ , інакше  $p[14,1]=0$ ;

15) якщо особа має аутоімунні стани, то  $p[15,1]=1$ , інакше  $p[15,1]=0$ .

Враховуючи розроблені правила, метод підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням правових підстав складається з наступних кроків:

1) складання опитувальників для визначення необхідності вакцинації та можливості вакцинації від Covid'19, які базуються на вище наведених цивільно-правових підставах щодо необхідності (категорії працівників) та можливості (існуючі медичні протипоказання та застереження) вакцинації від Covid'19;

2) заповнення другого стовпця матриці  $p$  з метою подальшого формування висновку про тип протипоказання та його тривалість:  $p[1,2]$  = “тимчасові протипоказання (до 2-х тижнів від початку хвороби)”;  $p[2,2]$  = “тимчасові

протипоказання (до 3-х місяців від часу перебігу Covid'19)";  $p[3,2]$  = "тимчасові протипоказання (3 місяці від завершення лікування)";  $p[4,2]$  = "до кінця вагітності протипоказано введення живих вакцин, вакцини CoronaVac/Sinovac Biotech";  $p[5,2]$  = "до кінця лактації протипоказано введення вакцини CoronaVac/Sinovac Biotech";  $p[6,2]$  = "тимчасові протипоказання (14 днів з моменту введення іншої вакцини)";  $p[7,2]$  = "тимчасові протипоказання (до оцінки проби/IGRA)";  $p[8,2]$  = "тимчасові протипоказання (на підставі рівня імуносупресії)";  $p[9,2]$  = "постійні протипоказання для вакцин на векторній основі (AstraZeneca)";  $p[10,2]$  = "постійні протипоказання для мРНК вакцин (Pfizer/BioNTech)";  $p[11,2]$  = "вакцинація з пересторогою (не раніше ніж через 3 місяці після таких процедур)";  $p[12,2]$  = "вакцинація з пересторогою (до відновлення абсолютної кількості нейтрофілів)";  $p[13,2]$  = "вакцинація з пересторогою (протипоказано введення живих вакцин)";  $p[14,2]$  = "постійні протипоказання (для конкретних вакцин, на які або на складові яких була алергічна/анафілактична реакція)";  $p[15,2]$  = "вакцинація з пересторогою";

3) проведення опитування (з використанням складених опитувальників) пацієнта, який планує виконати вакцинацію, на предмет його професії та місця роботи з метою визначення необхідності вакцинації, а також на предмет виявлення наявних у пацієнта захворювань та актуального стану здоров'я, які можуть стати протипоказаннями для вакцинації, з метою визначення можливості вакцинації від Covid'19;

4) аналіз наданих пацієнтом відповідей та заповнення масиву  $n$  з використанням кожного з розроблених правил для прийняття рішення щодо необхідності вакцинації від Covid'19;

5) якщо  $n[i]=1$  ( $i=1..6$ ), то пацієнту надається висновок щодо обов'язковості його вакцинації від Covid'19, інакше, якщо всі елементи масиву  $n$  дорівнюють 0, то пацієнту надається висновок щодо необов'язковості (але бажаності) його вакцинації від Covid'19;

6) аналіз наданих пацієнтом відповідей та заповнення першого стовпця матриці  $p$  з використанням кожного з розроблених правил для прийняття рішення щодо можливості вакцинації від Covid'19;

7) якщо  $p[j,1]=1$  ( $j=1..15$ ), то пацієнту видається висновок щодо протипоказань до його вакцинації від Covid'19, інакше, якщо всі елементи першого стовпця матриці  $p$  дорівнюють 0, то паці-

єнту видається висновок щодо можливості його вакцинації від Covid'19;

8) якщо  $p[j,1]=1$  ( $j=1..15$ ), то пацієнту видається також висновок про тип протипоказання та його тривалість – елемент  $p[j,2]$  ( $j=1..15$ ) матриці  $p$ .

Розроблений метод підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням правових підстав забезпечує: висновок щодо обов'язковості або необов'язковості (але бажаності) вакцинації від Covid'19 – в залежності від професії та місця роботи пацієнта; висновок щодо можливості або протипоказань до вакцинації від Covid'19 – в залежності від наявних захворювань та актуального стану здоров'я пацієнта; висновок про тип протипоказання та його тривалість – в разі висновку про протипоказання до вакцинації від Covid'19.

Розроблений метод є підґрунтям для системи підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19, яка буде надалі реалізована авторами у вигляді веб-орієнтованого додатку, доступного 24/7, без будь-якої реєстрації. Ця система надаватиме висновок щодо обов'язковості або необов'язковості з точки зору професії та місця роботи (але бажаності) вакцинації від Covid'19; висновок щодо можливості або протипоказань до вакцинації від Covid'19; висновок про тип протипоказання та його тривалість, завдяки чому система буде корисною для пацієнтів, які, відповівши на питання системи, отримують висновок щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 їх або їх родичів, а також для сімейних лікарів, на яких зменшиться навантаження щодо консультацій пацієнтів та яким стане легше відповідати на питання щодо необхідності та можливості вакцинації, оскільки вже не потрібно буде знати всі діючі законодавчі акти та цивільно-правові підстави. Звісно, що пропонується система передбачає правдиві відповіді користувачів.

Розглянемо функціонування розробленого методу підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням правових підстав.

На основі вищенаведених цивільно-правових підстав щодо необхідності (категорії працівників) та можливості (існуючі медичні протипоказання та застереження) вакцинації від Covid'19 було складено опитувальники для визначення необхідності вакцинації та можливості вакцинації від Covid'19. Заповнено другий стовпець матриці  $p$  з метою

подальшого формування висновку про тип протипоказання та його тривалість згідно із кроком 2 розробленого методу. Проведено опитування пацієнта, який планує вакцинуватись від Covid'19, на предмет його професії та місця роботи та на предмет виявлення наявних у пацієнта захворювань та актуального стану здоров'я – з метою визначення необхідності та можливості вакцинації.

Пацієнт надав відповіді, на основі яких відбулось заповнення масиву  $n$  з використанням кожного з розроблених правил для прийняття рішення щодо необхідності вакцинації від Covid'19. Пацієнт є лікарем, тому масив  $n = [0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0]$ . Оскільки  $n[5]=1$ , то пацієнту надається висновок щодо обов'язковості його вакцинації від Covid'19.

На основі аналізу наданих пацієнтом відповідей відбулось заповнення першого стовпця матриці  $p$  з використанням кожного з розроблених правил для прийняття рішення щодо можливості вакцинації від Covid'19. Пацієнт має тромбоз та тромбоцитопенію, в такому разі елемент матриці  $p[9,1]=1$ .

Оскільки  $p[9,1]=1$ , то пацієнту надається висновок щодо протипоказань до його вакцинації від Covid'19, а також висновок про тип протипоказання та його тривалість – «постійні протипоказання для вакцин на векторній основі (AstraZeneca)». Отже, пацієнту протипоказана вакцинація вакциною на векторній основі (AstraZeneca), проте він може бути вакцинований вакциною іншого типу. Пацієнт, проаналізувавши отримані висновки, прийняв рішення вакцинуватись вакциною неекторного типу, отримав дві дози вакцини Pfizer/BioNTech, які успішно переніс. Коагулограма після вакцинації не показала значних відхилень, отже, вакцина не посилила його тромбоз та тромбоцитопенію.

**Висновки.** Проведений огляд відомих рішень для підтримки прийняття рішення про вакцинацію від Covid'19 показав, що при чималій кількості різних рішень, запропонованих у 2021-2022 роках,

система підтримки прийняття рішень щодо необхідності вакцинації від Covid'19 не розроблена на сьогодні, а наявні рішення не можуть бути використані для отримання висновку про необхідність та можливість вакцинації від Covid'19.

Проведений аналіз цивільно-правових підстав щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 в Україні дав можливість визначити категорії працівників, які підлягають обов'язковій вакцинації, а також перелік медичних протипоказань та застережень, за якими надаються протипоказання до вакцинації проти Covid'19.

Розроблений метод підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням правових підстав забезпечує: висновок щодо обов'язковості або необов'язковості (але бажаності) вакцинації від Covid'19 – в залежності від професії та місця роботи пацієнта; висновок щодо можливості або протипоказань до вакцинації від Covid'19 – в залежності від наявних захворювань та актуального стану здоров'я пацієнта; висновок про тип протипоказання та його тривалість – в разі висновку про протипоказання до вакцинації від Covid'19.

Наразі запропонований метод підтримки прийняття рішень щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням правових підстав допомагає прийняти рішення щодо необхідності та можливості вакцинації тільки на основі діючого законодавства України, проте він може бути адаптований до законодавства будь-якої країни – для цього потрібно провести аналіз цивільно-правових підстав щодо необхідності та можливості вакцинації від Covid'19 певної країни; доповнити або змінити правила для прийняття рішення щодо необхідності вакцинації від Covid'19, а також правила для прийняття рішення щодо можливості вакцинації від Covid'19 з врахуванням проведеного аналізу цивільно-правових підстав певної країни.

#### Список літератури:

1. Cresswell K., Majeed A., Bates D., Sheikh A. Computerised decision support systems for healthcare professionals: An interpretative review. *The Journal of Innovation in Health Informatics*. 2012. Vol. 20. Issue 2. Pp. 115-128.
2. Coronavirus (COVID-19) Vaccinations. Web-site. URL: <https://ourworldindata.org/covid-vaccinations> (Last accessed: June 9, 2022).
3. Syundyukov E., Mednis M., Zaharenko L., Pildegovica E., Danovska I., Kistkins S., Seidmann A., Bennis A., Pirags V., Tzivian L. COVID-19 vaccination readiness: use of digital technologies for data-driven decision making. *European Journal of Public Health*. 2021. Vol. 31. Pp. 105.
4. Groenewald C. To Vaccinate or Not? Decision-Making in the Time of COVID-19 Vaccines. *Cultural Studies-Critical Methodologies*. 2022. Volume 22. Issue 1. Pp. 89-95.
5. Varotsos C., Krapivin V., Xue Y., Soldatov V., Voronova T. COVID-19 pandemic decision support system for a population defense strategy and vaccination effectiveness. *Safety Science*. 2021. Vol. 142. Article № 105370.

6. Zolezzi M., Paravattil B., El-Gaili T. Using motivational interviewing techniques to inform decision-making for COVID-19 vaccination. *International Journal of Clinical Pharmacy*. 2021. Vol. 43. Issue 6. Pp. 1728–1734.
7. Riad A., Huang Y., Abdulqader H., Morgado M., Domnori S., Kosciak M., Mendes J., Klugar M., Kateeb E. Universal Predictors of Dental Students' Attitudes towards COVID-19 Vaccination: Machine Learning-Based Approach. *Vaccines*. 2021. Vol. 9. Issue 10. Article № 1158.
8. Cerda A., Garcia L. Hesitation and Refusal Factors in Individuals' Decision-Making Processes Regarding a Coronavirus Disease 2019 Vaccination. *Frontiers in Public Health*. 2021. Vol. 9. Article № 626852.
9. Botwright S., Giersing B., Meltzer M., Kahn A., Jit M., Baltussen R., El Omeiri N., Biey J., Moore K., Thokala P., Mwenda J., Bertram M., Hutubessy R. The CAPACITI Decision-Support Tool for National Immunization Programs. *Value in Health*. 2021. Vol. 24. Issue 8. Pp. 1150-1157.

**Hovorushchenko T.O., Hnatchuk Ye.H. RULES AND METHOD OF SUPPORTING THE DECISION-MAKING ON THE NEED AND POSSIBILITY OF COVID'19 VACCINATION ON LEGAL GROUNDS**

*A review of known decisions for supporting the decision-making about Covid'19 vaccination showed that with the many different solutions proposed in 2021–2022, the Covid'19 vaccination decision support system has not been developed to date and existing solutions cannot be used to conclude on the need and possibility of vaccination from Covid'19.*

*The analysis of civil law grounds on the need and possibility of vaccination against Covid'19 in Ukraine made it possible to determine the categories of workers subject to compulsory vaccination, as well as a list of medical contraindications and precautions for contraindications to vaccination against Covid'19.*

*The developed method of supporting the decision-making on the need and possibility of vaccination from Covid'19, taking into account the legal grounds, provides: a conclusion on the mandatory or optional (but desirable) vaccination against Covid'19 – depending on the profession and place of work of the patient; conclusion on the possibility or contraindications to vaccination from Covid'19 – depending on the existing diseases and the current state of health of the patient; conclusion on the type of contraindication and its duration – in the case of the conclusion on contraindications to vaccination from Covid'19.*

*The developed method is a theoretical basis for the future decision support system on the need and possibility of vaccination from Covid'19, taking into account the legal basis, which will provide an opinion on whether or not mandatory in terms of profession and place of work (but desirability) vaccination from Covid'19; conclusion on the possibility or contraindications to vaccination from Covid'19; conclusion on the type of contraindication and its duration, so the system will be useful for patients who, answering questions from the system, will receive a conclusion on the need and possibility of vaccination from Covid'19 for them or their relatives, as well as family physicians who will reduce the burden of patient consultations and which will make it easier to answer questions about the need and possibility of vaccination, as it will no longer be necessary to know all the current legislation and civil law.*

**Key words:** Covid'19 vaccination, decision-making, method of supporting the decision-making on the need and possibility of Covid'19 vaccination on legal grounds.

**Здоренко В.Г.**

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

**Барилко С.В.**

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

**Лісовець С.М.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Ківа І.Л.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ В ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛАХ

*Як відомо, в різних галузях промисловостей під час виробництва часто використовуються листові матеріали. До них відносяться такі матеріали, як фаніра, деревинностружкові плити, неткані матеріали, текстиль, шкіра і багато інших. Їх головна особливість полягає в тому, що вони мають великі значення довжини і ширини, але невелике значення товщини. Однією з важливих властивостей таких матеріалів при здійсненні їх неруйнівного контролю є швидкість розповсюдження в них акустичних коливань (якщо такий матеріал є однорідним) або усереднена швидкість (якщо такий матеріал є неоднорідним). За такою швидкістю можна визначити інші властивості листових матеріалів, наприклад, їх міцність. Так як при здійсненні неруйнівного акустичного контролю електроакустичний перетворювач і листовий матеріал, зазвичай, знаходяться на певній відстані, то це додаткове середовище розповсюдження акустичних коливань (наприклад, повітря) може вносити в результат контролю значну похибку. Тому метою дослідження було виключення або зменшення до мінімально можливого впливу на результат контролю середовища між електроакустичним перетворювачем і листовим матеріалом. Суть такого контролю полягала в тому, що зондуючі пакети акустичних коливань через середовище розповсюдження випромінювалися в сторону листового матеріалу, де відбувалося їх багаторазове відбиття від зовнішньої і внутрішньої поверхонь листового матеріалу. Далі шляхом використання стробування оброблялися тільки ті пакети, які були необхідні для отримання результату контролю, а інші пакети відсіювалися. В результаті такої обробки усереднена швидкість акустичних коливань в листовому матеріалі визначалася тільки на основі часу відбиття необхідних пакетів акустичних коливань і товщини листового матеріалу, а властивості додаткового середовища розповсюдження акустичних коливань (зокрема, повітря) в розрахунки не входили. Таким чином, достовірність визначення швидкості акустичних коливань в листових матеріалах підвищувалася. Для деяких листових матеріалів такий неруйнівний акустичний контроль було здійснено експериментально.*

**Ключові слова:** внутрішня поверхня, зовнішня поверхня, листовий матеріал, неруйнівний акустичний контроль, пакет коливань, швидкість акустичних коливань.

**Постановка проблеми.** Під час виробництва різноманітних виробів в різних галузях промисловостей часто використовуються матеріали, один з розмірів яких є невеликим відносно інших двох розмірів. Це так звані листові матеріали. Вони можуть мати великі значення довжини і ширини, але невелике значення товщини. Листових матеріалів є досить багато, вони сильно відрізняються один від одного за своїми властивостями. Напри-

клад, в будівництві часто використовується фаніра і деревинностружкові плити, при виробництві автотранспортних засобів – неткані матеріали, при виготовленні одягу і взуття – текстиль і шкіра. Такий перелік можна довго продовжувати.

Для забезпечення заданих властивостей таких матеріалів як в процесі виготовлення, так і в процесі експлуатації застосовуються різні види контролю [1; 2]. Причому перевага зазвичай



надається контролю неруйнівному, так як при цьому матеріал, який контролюється, остається неушкодженим. Одним з таких неруйнівних контролів є неруйнівний акустичний контроль [3–5]. Зазвичай він здійснюється або методом відбиття, або методом проходження, або одночасно двома такими методами [6; 7]. При такому контролі використовуються випромінюючі і приймаючі електроакустичні перетворювачі, які взаємодіють з матеріалом, що контролюється, шляхом відповідно випромінення і приймання акустичних (пружних) коливань. Особливо зручно застосовувати акустичний контроль для листових матеріалів, так як зміна місця контролю зазвичай досягається зміною положення відповідних електроакустичних перетворювачів.

Однією з властивостей матеріалів, які контролюються, є швидкість розповсюдження в них акустичних коливань (якщо такий матеріал є однорідним) або усереднена швидкість (якщо такий матеріал є неоднорідним) [8]. В загальному випадку за значенням швидкості можна визначити задану властивість матеріалу, а за зміною швидкості – відповідно зміну такої властивості. Наприклад, при відшаруванні шарів форніра один від одного його міцність буде зменшуватися, і при цьому усереднена швидкість акустичних коливань через товщу форніра також буде зменшуватися (в основному за рахунок появи додаткових прошарків повітря).

При здійсненні неруйнівного акустичного контролю одним з факторів, який впливає на такий контроль, є середовище між електроакустичними перетворювачами і матеріалом, який контролюється. Таким середовищем може бути повітря або узгоджувальний шар (наприклад, у вигляді імер-

сійної рідини). Часто властивості такого середовища можуть змінюватися з часом: типовим є зміна температури повітря і товщини імерсійної рідини. Отже, достовірність визначення швидкості акустичних коливань в матеріалах (зокрема, в листових) можна підвищити, якщо виключити або зменшити до мінімально можливого вплив на результат контролю середовища між електроакустичними перетворювачами і матеріалом.

В загальному випадку спосіб визначення швидкості акустичних коливань на основі часу проходження цих коливань через середовище, яке контролюється, є відомим [9; 10]. Зокрема, пристрій [10] було обрано в якості прототипу. Метою проведеного дослідження, результати якого відображаються в статті, було вдосконалення існуючого способу визначення швидкості акустичних коливань і його експериментальна перевірка на деяких листових матеріалах.

Основний текст статті. Таке вдосконалення існуючого способу визначення швидкості акустичних коливань в листовому матеріалі було реалізоване за допомогою пристрою, структура якого наведена на рис. 1. До його складу входять генератор пакетів електричних коливань 1, підсилювач потужності 2, електроакустичний перетворювач 3, попередній підсилювач 4, блок стробування 5, амплітудний детектор 6, формувач імпульсів 7, тригер 8, вимірювальний прилад 9, частотомір 10, повітря (узгоджувальний шар) 11 і листовий матеріал 12.

На початку  $n$ -го циклу вимірювання генератор пакетів електричних коливань 1 формує зондуючий пакет електричних коливань, який підсилюється підсилювачем потужності 2 і надходить на електроакустичний перетворювач 3. Одночасно

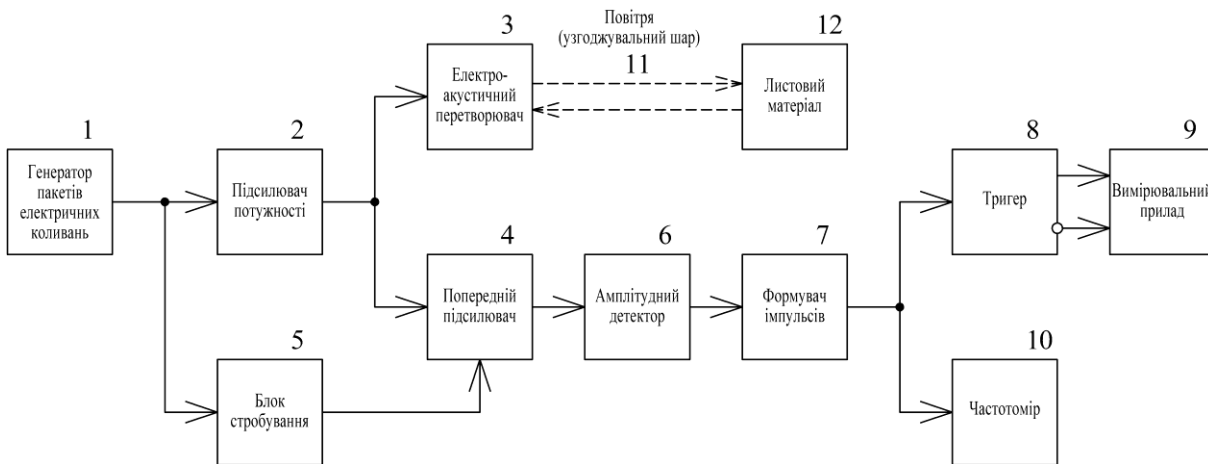


Рис. 1. Структура пристрою для визначення швидкості акустичних коливань в листовому матеріалі

з цим цей зонduючий пакет електричних коливань надходить на попередній підсилювач 4 – але блок стробування 5 на заданий час відключає попередній підсилювач 4 таким чином, щоб зонduючий пакет електричних коливань далі на амплітудний детектор 6 не потрапив.

Електроакустичний перетворювач 3 перетворює зонduючий пакет електричних коливань в зонduючий пакет акустичних коливань, який через повітря (узгоджувальний шар) 11 надходить в листовий матеріал 12 (див. рис. 2). При надходженні зонduючого пакета акустичних коливань в листовий матеріал 12 виникає 1-й пакет акустичних коливань, який відбився від зовнішньої поверхні листового матеріалу 12. 1-й пакет акустичних коливань, який відбився від зовнішньої поверхні листового матеріалу 12, перетворюється електроакустичним перетворювачем 3 в пакет електричних коливань і надходить на попередній підсилювач 4 – але блок стробування 5 на заданий час відключає попередній підсилювач таким чином, щоб цей пакет електричних коливань далі на амплітудний детектор 6 не потрапив.

Таким чином, блок стробування 5 відключає попередній підсилювач 4 в наступних двох випад-

ках: при надходженні на нього зонduючого пакета електричних коливань і пакета електричних коливань, що отриманий в результаті перетворення в нього 1-го пакета акустичних коливань, який відбився від зовнішньої поверхні листового матеріалу 12.

Зонduючий пакет акустичних коливань, який надійшов на листовий матеріал 12, також проходить крізь нього у вигляді 1-го пакета акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12, і відбивається від внутрішньої поверхні листового матеріалу 12. 1-й пакет акустичних коливань, який відбився від внутрішньої поверхні листового матеріалу 12, проходить листовий матеріал 12 в зворотному напрямі і далі проходить через його зовнішню поверхню. При цьому формуються 2-й пакет акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12, і 2-й пакет акустичних коливань, який відбився від зовнішньої поверхні листового матеріалу 12. 2-й пакет акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12, перетворюється електроакустичним перетворювачем 3 в пакет електричних

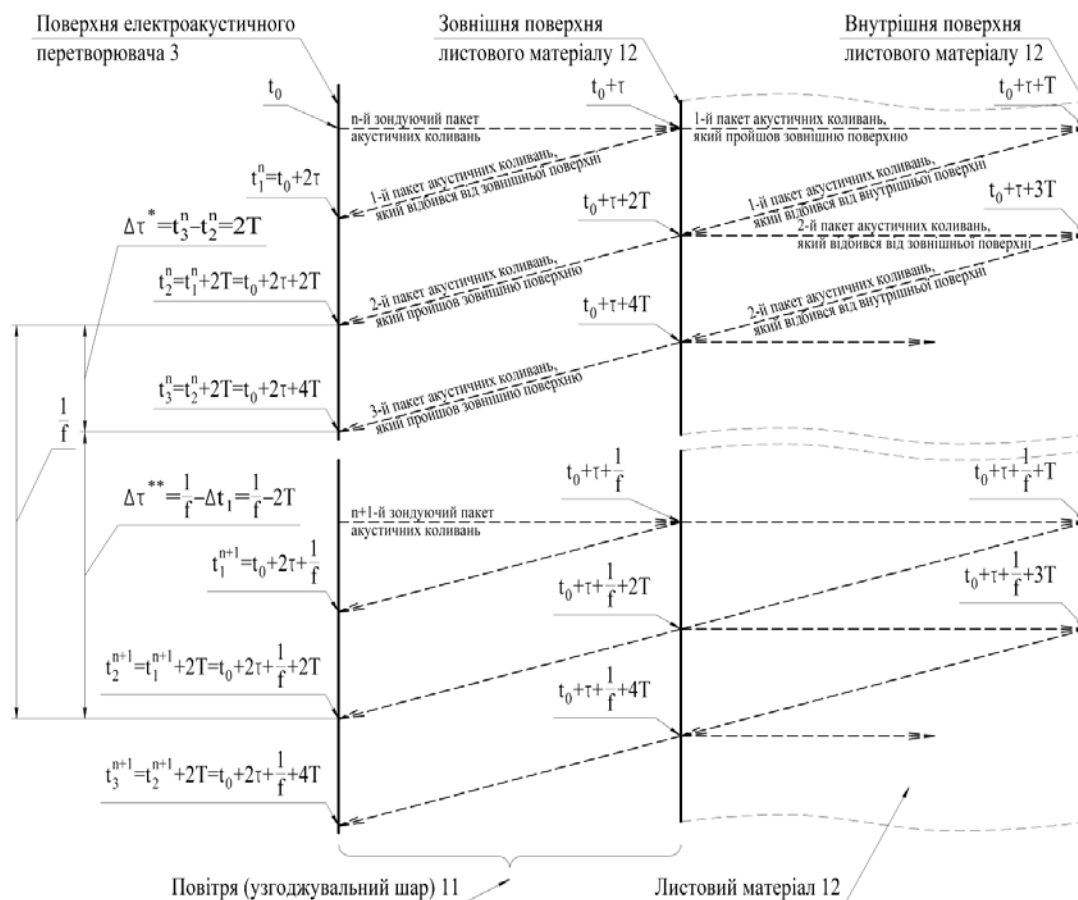


Рис. 2. Розподіл акустичних коливань в листовому матеріалі

коливань і надходить на попередній підсилювач 4 – причому блок стробування 5 на заданий час підключає попередній підсилювач 4 таким чином, щоб цей пакет електричних коливань на амплітудний детектор 6 потрапив.

2-й пакет акустичних коливань, який відбився від зовнішньої поверхні листового матеріалу 12, проходить крізь нього і відбивається від внутрішньої поверхні листового матеріалу 12. 2-й пакет акустичних коливань, який відбився від внутрішньої поверхні листового матеріалу 12, проходить листовий матеріал 12 в зворотному напрямі і далі проходить через його зовнішню поверхню. При цьому формується 3-й пакет акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12. Цей пакет перетворюється електроакустичним перетворювачем 3 в пакет електричних коливань і надходить на попередній підсилювач 4 – причому блок стробування 5 на заданий час підключає попередній підсилювач 4 таким чином, щоб цей пакет електричних коливань на амплітудний детектор 6 потрапив.

В результаті на виході попереднього підсилювача 4 формується періодична послідовність з двох різних пакетів електричних коливань: пакетів електричних коливань, що отримані в результаті перетворення в них 2-х пакетів акустичних коливань, які пройшли зовнішню поверхню листового матеріалу 12, і пакетів електричних коливань, що отримані в результаті перетворення в них 3-х пакетів акустичних коливань, які пройшли зовнішню поверхню листового матеріалу 12. З цих пакетів електричних коливань амплітудний детектор 6 і формувач імпульсів 7 формують короткі електричні імпульси, які надходять на тригер 8. Причому “порог спрацьовування” амплітудного детектора 6 і формувача імпульсів 7 обирається таким чином, щоб пакети електричних коливань, що отримані в результаті перетворення в них 4-х, 5-х, 6-х і так далі пакетів акустичних коливань, які пройшли зовнішню поверхню листового матеріалу 12, не приводили до формування додаткових коротких електричних імпульсів.

Тригер 8 має два входи: один з них є прямим, а інший є інверсним. Таким чином, тригер 8 перемикається в одне положення (і формує напругу одного рівня) з частотою надходження пакетів електричних коливань, що отримані в результаті перетворення в них 2-х пакетів акустичних коливань, які пройшли зовнішню поверхню листового матеріалу 12, і в інше положення (і формує напругу іншого рівня) з частотою надходження пакетів електричних коливань, що отри-

мані в результаті перетворення в них 3-х пакетів акустичних коливань, які пройшли зовнішню поверхню листового матеріалу 12. Тривалість  $\Delta t^*$  напруги одного рівня визначається часовим інтервалом між: приходом 2-го пакету акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12 в  $n$ -му циклі вимірювання, і приходом 3-го пакету акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12 в  $n$ -му циклі вимірювання. Тривалість  $\Delta t^{**}$  напруги іншого рівня визначається часовим інтервалом між: приходом 3-го пакету акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12 в  $n$ -му циклі вимірювання, і приходом 2-го пакету акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12 в  $n + 1$ -му циклі вимірювання. Вимірювальний прилад 9 дозволяє ці тривалості  $\Delta t^*$  і  $\Delta t^{**}$  вимірювати. Припускається, що зондуєчий пакет акустичних коливань надходить через повітря (узгоджувальний шар) 11 в листовий матеріал 12 періодично. Також припускається, що часові затримки в електричних блоках пристрою, за виключенням електроакустичного перетворювача 3, або відсутні, або ними можна нехтувати.

Пакет електричних коливань, що отриманий в результаті перетворення в нього 1-го пакета акустичних коливань, який відбився від зовнішньої поверхні листового матеріалу 12, надійде на попередній підсилювач 4 в момент часу

$$t_1^n = t_0 + 2\tau, \quad (1)$$

де  $t_0$  – час появи зондуєчого пакета електричних коливань на вході електроакустичного перетворювача 3 в  $n$ -му циклі вимірювання;  $\tau$  – часова затримка в електроакустичному перетворювачі 3 і повітрі (узгоджувальному шарі) 11.

Так як в момент часу  $t_1^n$  попередній підсилювач 4 є відключеним блоком стробування 5, то цей пакет електричних коливань далі на амплітудний детектор 6 не потрапляє.

Пакет електричних коливань, що отриманий в результаті перетворення в нього 2-го пакета акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12, надійде на попередній підсилювач 4 в момент часу

$$t_2^n = t_1^n + 2T = t_0 + 2\tau + 2T, \quad (2)$$

де  $T$  – час проходження пакетами акустичних коливань відстані між зовнішньою і внутрішньою поверхнями листового матеріалу 12.

Так як в момент часу  $t_2^n$  попередній підсилювач 4 є підключеним блоком стробування 5, то цей

пакет електричних коливань далі на амплітудний детектор 6 потрапляє.

Пакет електричних коливань, що отриманий в результаті перетворення в нього 3-го пакета акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12, надійде на попередній підсилювач 4 в момент часу

$$t_3^n = t_2^n + 2T = t_0 + 2\tau + 4T. \quad (3)$$

Так як в момент часу  $t_3^n$  попередній підсилювач 4 є підключеним блоком стробування 5, то цей пакет електричних коливань далі на амплітудний детектор 6 потрапляє.

Пакети електричних коливань, що отримані в результаті перетворення в них 4-го, 5-го, 6-го і так далі пакетів акустичних коливань, які пройшли зовнішню поверхню листового матеріалу 12, також надходять на попередній підсилювач 4 через часові інтервали, які кратні  $2T$ , але амплітудний детектор 6 і формувач імпульсів 7 їх далі не пропускає, так як їх амплітуда стає менше “порога спрацьовування”.

В  $n+1$ -му циклі вимірювання пакет електричних коливань, що отриманий в результаті перетворення в нього 1-го пакета акустичних коливань, який відбився від зовнішньої поверхні листового матеріалу 12, надійде на попередній підсилювач 4 в момент часу

$$t_1^{n+1} = t_0 + 2\tau + \frac{1}{f}, \quad (4)$$

де  $f$  – початкова частота слідування зондуючих пакетів електричних коливань.

Початкова частота  $f$  вимірюється за допомогою частотоміра 10.

Пакет електричних коливань, що отриманий в результаті перетворення в нього 2-го пакета акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12, надійде на попередній підсилювач 4 в момент часу

$$t_2^{n+1} = t_1^{n+1} + 2T = t_0 + 2\tau + \frac{1}{f} + 2T. \quad (5)$$

Пакет електричних коливань, що отриманий в результаті перетворення в нього 3-го пакета акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12, надійде на попередній підсилювач 4 в момент часу

$$t_3^{n+1} = t_2^{n+1} + 2T = t_0 + 2\tau + \frac{1}{f} + 4T. \quad (6)$$

Таким чином, короткі електричні імпульси на тригер 8 будуть надходити в моменти часу  $t_2^n$  і  $t_2^{n+1}$ .

Отже, тригер 8 буде формувати напругу одного рівня протягом часового інтервалу

$$\Delta\tau^* = t_3^n - t_2^n = (t_0 + 2\tau + 4T) - (t_0 + 2\tau + 2T) = 2T, \quad (7)$$

і формувати напругу іншого рівня протягом часового інтервалу

$$\Delta\tau^{**} = \frac{1}{f} - \Delta\tau_1 = \frac{1}{f} - 2T. \quad (8)$$

Різниця між часовим інтервалами  $\Delta\tau^*$  і  $\Delta\tau^{**}$  вимірюється за допомогою вимірювального приладу 9. Якщо, наприклад, виконується умова  $\Delta\tau^* \neq \Delta\tau^{**}$ , то показання цього приладу будуть ненульовими.

Далі необхідно змінювати частоту  $f$  генератора пакетів електричних коливань 1 до значення  $f^*$  доти, поки показання цього приладу не стануть нульовими. При цьому при зближенні  $\Delta\tau_1$  та  $\Delta\tau_2$  3-й пакет акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12 в  $n$ -му циклі вимірювання, починає співпадати з 1-м пакетом акустичних коливань, який відбився від внутрішньої поверхні листового матеріалу 12 в  $n+1$ -му циклі вимірювання.

Якщо виконується умова  $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2$ , то ці пакети повністю співпадають, і при цьому блок стробування 5 відключає попередній підсилювач 4 таким чином, щоб 1-й пакет акустичних коливань, який відбився від внутрішньої поверхні листового матеріалу 12 в  $n+1$ -му циклі вимірювання (а разом з ним і 3-й пакет акустичних коливань, який пройшов зовнішню поверхню листового матеріалу 12 в  $n$ -му циклі вимірювання) далі на амплітудний детектор 6 не потрапили.

Таким чином, на тригер 8 будуть надходити тільки 2-і пакети акустичних коливань, які відбилися від внутрішньої поверхні листового матеріалу 12 в  $n$ -му і  $n+1$ -му циклах вимірювання.

З умови  $\Delta\tau^* = \Delta\tau^{**}$  можна отримати, що

$$2T = \frac{1}{f^*} - 2T, \quad (9)$$

звідки

$$T = \frac{1}{4f^*}. \quad (10)$$

Якщо товщина  $L$  листового матеріалу 12 відома, то усереднена швидкість розповсюдження в ньому акустичних коливань становить

$$c = \frac{L}{T} = 4f^*L. \quad (11)$$

Як можна побачити з формули (11), часова затримка  $\tau$  в електроакустичному перетворю-

вачі 3 і повітрі (узгоджувальному шарі) 11 в неї не входить. У порівнянні з прототипом [10] розроблене обладнання було удосконалене шляхом застосування електроакустичного перетворювача з покращеними властивостями і засобів обчислювальної техніки.

**Висновки.** В статті показано, що, застосовуючи вибіркового аналіз багаторазового відбиття пакетів акустичних коливань від зовнішньої і внутрішньої поверхонь листового матеріалу, можна підвищити достовірність визначення швидкості акустичних коливань в такому матеріалі.

### Список літератури:

1. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
2. Радько О.В., Медведєва Н.А., Кремешний О.І. Вибір методів контролю якості конструкційних елементів машин та механізмів. *Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал*. Х. : Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. № 2 (42). С. 127–130.
3. Лазарев М.І., Шматков Д.І. Неруйнуючий контроль технічних об'єктів у схемах : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Харків : УПА, 2012. 162 с.
4. Скальський В.Р., Сулим Г.Т. Основи акустичних методів неруйнівного контролю. Львів: Видав. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. 386 с.
5. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля : практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. М. : Высш. шк., 1991. 283 с.: ил.
6. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела М. : Наука, 1978. 791 с.
7. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Маципура В.Т. Основы акустики : учебное пособие. К. : Наукова думка, 2007. 640 с.
8. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973. 343 с.
9. Патент № 50186. Україна. МПК G01H 7/00. Спосіб вимірювання часу проходження акустичних імпульсів. – Київський національний університет технологій та дизайну; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. № u200913061; Заявл. 15.12.2009 ; Опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
10. Лісовець С.М., Скрипник Ю.О. Вимірювання часу проходження акустичних імпульсів в твердотільних середовищах. *Вісник КНУТД*. 2010. № 1 (51). С. 17–23.

### Zdorenko V.H., Barylko S.V., Lisovets S.M., Kiva I.L. IMPROVING RELIABILITY OF DETERMINATION OF SPEED OF ACOUSTIC OSCILLATIONS IN SHEET MATERIALS

*As is known, sheet materials are often used in various industries. These include materials such as plywood, particle boards, nonwoven materials, textiles, leather and many others. Their main feature is that they have large values of length and width, but a small value of thickness. One of the important properties of such materials when performing non-destructive testing is the speed of propagation of acoustic oscillations in them (if such material is homogeneous) or the average speed (if such material is heterogeneous). Other properties of the sheet materials, such as their strength, can be determined by this speed. Since the electroacoustic transducer and the sheet material are usually at a certain distance when performing nondestructive acoustic testing, this additional medium of propagation of acoustic oscillations (for example, air) can introduce a significant error into the test result. Therefore, the aim of the study was to eliminate or reduce to the minimum possible effect on the result of medium control between the electroacoustic transducer and the sheet material. The essence of such a control was that sounding packets of acoustic vibrations through the propagation medium were radiated towards the sheet material, where they were repeatedly reflected from the outer and inner surfaces of the sheet material. Then, only those packets that were needed to obtain the result of the control were processed by using strobing, and the remaining packets were screened out. As a result of such processing, the average acoustic vibration rate in the sheet material was determined only on the basis of the reflection time of the necessary acoustic vibration packets and the thickness of the sheet material, and the properties of the additional acoustic vibration propagation medium (in particular air) were not included in the calculations. Thus, the reliability of determining the speed of acoustic oscillations in sheet materials increased. For some sheet materials, such nondestructive acoustic testing was carried out experimentally.*

**Key words:** internal surface, external surface, sheet material, nondestructive acoustic test, vibration package, acoustic vibration rate.

**Зіноватна С.Л.**

Національний університет «Одеська політехніка»

**Тішакін М.В.**

Національний університет «Одеська політехніка»

**Буджеліда А.Н.**

Національний університет «Одеська політехніка»

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРОЦЕСІВ

*Процеси обробки даних у складних інформаційних системах потребують одночасного здійснення декількох операцій – паралельних обчислень. Реалізація паралельних обчислень може бути виконана двома способами: шляхом введення надлишковості незалежно працюючих елементів обчислювальної системи та з використанням обчислювальних технологій паралельного виконання, коли декілька різних команд обробки даних виконуються одночасно. Для виконання паралельних обчислень при наявності розподіленої пам'яті та декількох незалежно працюючих процесорів взаємодія між процесорами здійснюється з використанням інтерфейсу передачі даних MPI – Message Passing Interface. Відповідно до традиційних паралельних обчислень, для розподілу незалежних фрагментів обчислень між різними процесорами необхідно створити програмну реалізацію цих фрагментів та розташувати їх на відповідних процесорах. Інтерфейс передачі даних MPI дозволяє спростити вирішення задачі паралелізму обчислень: створюється всього одна програма, яка запускається на виконання на всіх існуючих в обчислювальній системі процесорах. Це відповідає моделі «одна програма множина процесів» – Single Program Multiple Processes (SPMP). У роботі розглянуто ефективність паралельних обчислень з використанням функцій прийому та передачі повідомлень бібліотеки MPI. Систематизовано структуру команд MPI, виділено загальні процедури, функції для організації прийому-передачі даних між обчислювальними процесами, колективні функції та набір функцій, що працює з комунікаторами, групами та областями зв'язку.*

*Формалізовано процеси для визначення реальної кількості завдань у запущеному застосунку та створення комунікатора-дуплікату для надійного поділу потоків повідомлень. Для обох процесів створено схеми алгоритмів, які прокоментовані відповідно до використовуваних методів бібліотеки MPI. Для початку та завершення процесу використано MPI\_Init та MPI\_Finalize. Визначення кількості завдань у застосунку та порядкового номера завдання виконано з використанням MPI\_Comm\_size та MPI\_Comm\_rank. При створенні комунікатора-дуплікату для надійного поділу потоків повідомлень використано змінений підхід до обробки помилок через MPI\_Abort та MPI\_Barrier.*

**Ключові слова:** розподілені обчислення, паралельні процеси, процесор, інтерфейс передачі даних, бібліотека MPI, структура команд, схема алгоритму.

**Постановка проблеми.** На теперішній час бурхливий розвиток інформаційних технологій знаходиться на тій стадії, коли зростання складності інформаційних систем вимагає пошуку нових технологій обчислень. Використання складних комп'ютерних вузлів та мереж різного масштабу обумовлює необхідність використання високопродуктивних розподілених обчислень. Це, в свою чергу, вимагає значний об'єм обчислювальних ресурсів, задіяних для виконання обчислювальних процесів. Стратегічним напрямком вирішення цих проблем є перехід до гнучкої структури інформаційної

системи з використанням паралельних та розподілених обчислень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Один із основних факторів, що визначають розвиток обчислювальної системи, – це висока продуктивність. Загальний метод збільшення продуктивності полягає у паралельній обробці інформації, тобто в одночасному розв'язанні кількох завдань або у поєднанні у часі етапів розв'язання одного завдання [1, с. 12].

Способи організації паралельної обробки інформації. З усього різноманіття способів такої організації можна виділити три основні напрямки [2, с. 4; 3, с. 836]:

1) поєднання у часі різних етапів різних завдань;

2) одночасне вирішення частин одного завдання;

3) конвеєрна обробка інформації.

Перший напрямок – це мультипрограмна обробка інформації. Мультипрограмна обробка можлива навіть у однопроцесорному комп'ютерному пристрої і широко використовується у сучасних системах обробки даних.

Другий напрямок можливий лише за наявності кількох обробних пристроїв. У цьому випадку використовуються ті чи інші особливості завдань чи потоків завдань, що дозволяє здійснити той чи інший вид паралелізму [4, с. 1584; 5, с. 210]. Можна виділити кілька типів паралелізму, що відбивають ці особливості.

Природний паралелізм незалежних завдань полягає в тому, що в систему надходить безперервний потік не пов'язаних між собою задач, тобто розв'язання будь-якої цієї задачі не залежить від результатів вирішення інших завдань.

Паралелізм незалежних гілок – один із найпоширеніших типів паралелізму в обробці інформації. Суть його полягає в тому, що при вирішенні

завдання можуть бути виділені окремі незалежні частини – гілки програми, які за наявності кількох обробних пристроїв можуть виконуватись паралельно та незалежно один від одного.

Паралелізм об'єктів чи даних має місце тоді, коли за однією і тією ж (або майже за однією і тією ж) програмою повинна оброблятися деяка сукупність даних, що надходять до системи одночасно [6, с. 8].

Розподілені системи здійснюють різноманітну обробку даних. Можна виділити наступні напрямки розподіленої обробки:

- застосування технологій організації обробки: COM, DCOM, CORBA;

- взаємодія з розподіленими сховищами даних;

- застосування технології обміну даними (MPI), агентів та мультиагентних систем.

В даний час існує багато технологій, які дозволяють найбільш легко організувати паралельні обчислення. Одна з найпопулярніших на даний момент технологій – це інтерфейс передачі повідомлень MPI (Message Passing Interface), який забезпечує взаємодію потоків при обробці даних [7, с. 1].

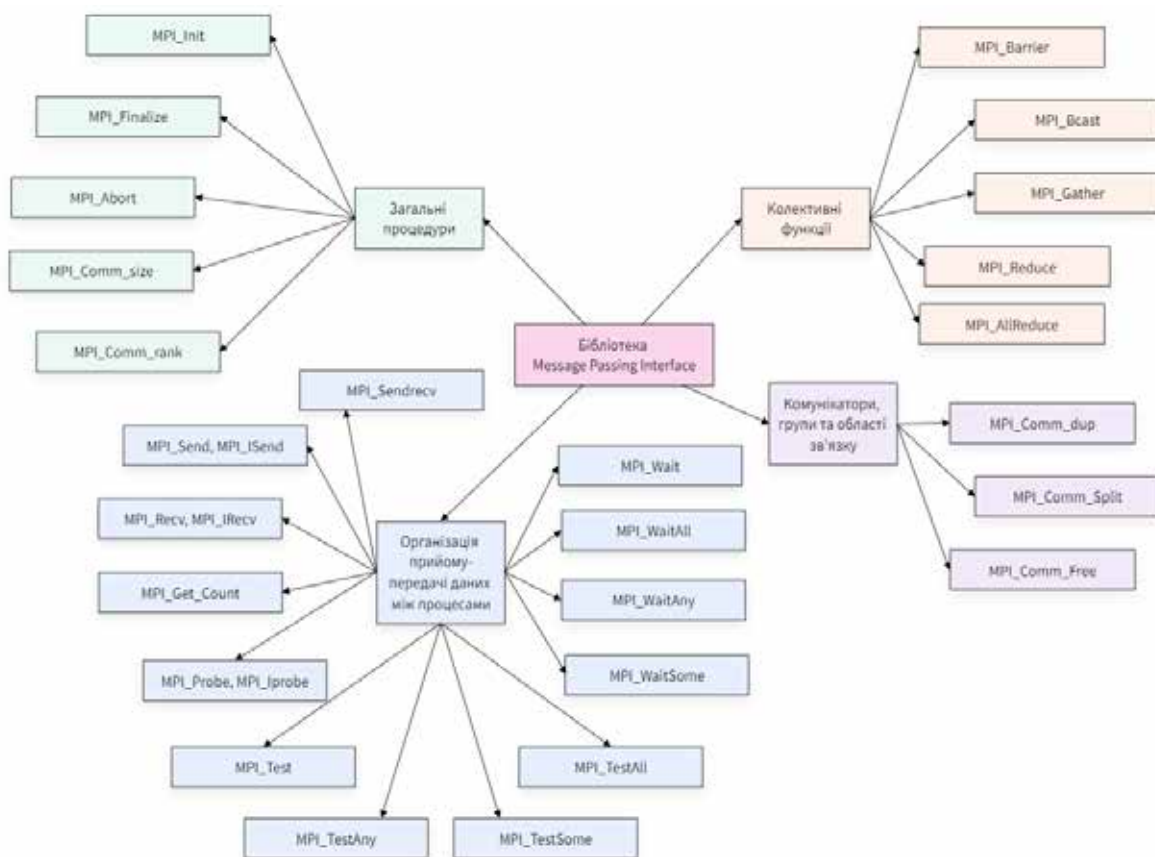


Рис. 1. Структура бібліотеки MPI



Рис. 2. Використання MPI для визначення кількості завдань у застосунку

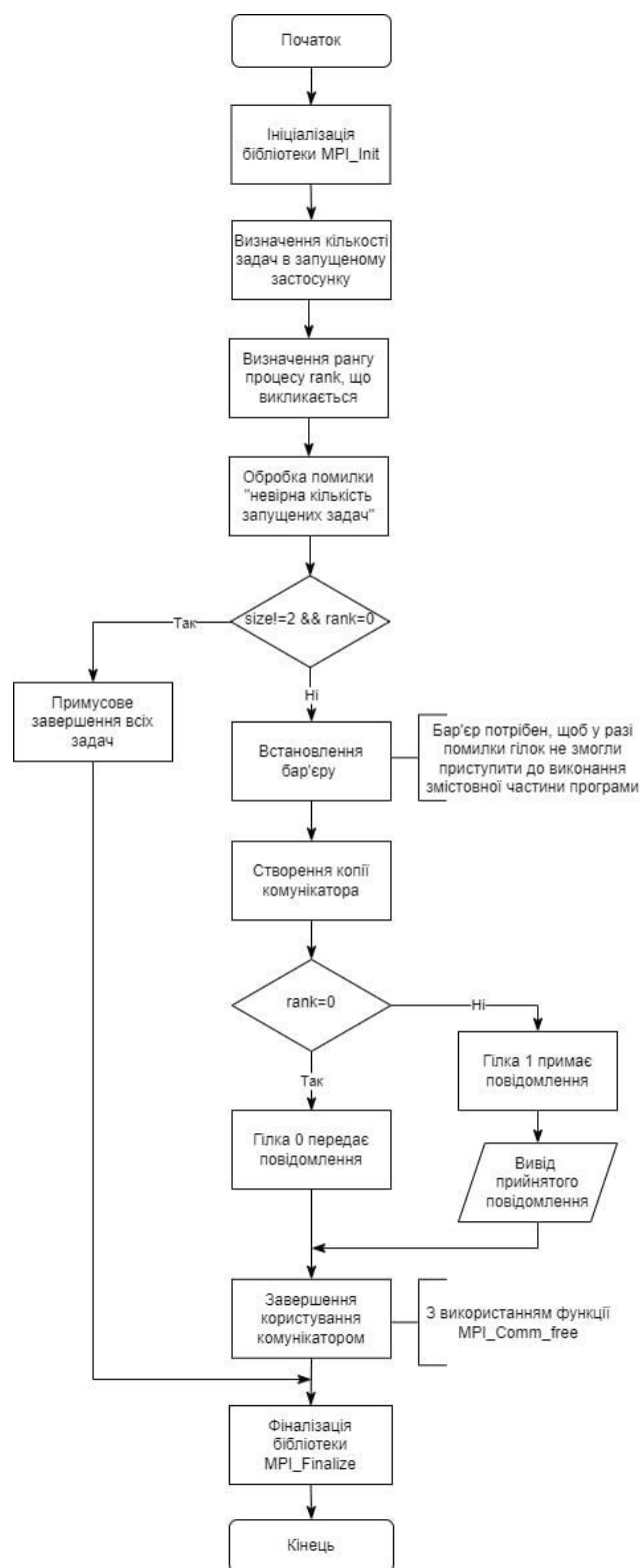


Рис. 3. Використання MPI для надійного поділу потоків повідомлень



Дана робота присвячена аналізу принципів роботи технології MPI. У рамках роботи цю технологію застосовано для організації взаємодії між пов'язаними процесами, які об'єднані у групу та протікають одночасно. Ця взаємодія включає як обмін даними (прийом-передача), так і синхронізацію взаємодіючих процесів у часі, а також моніторинг поточного стану і тривалості процесів.

**Мета роботи.** Метою роботи є формалізація процесу застосування технології паралельних обчислень MPI для організації взаємодії між пов'язаними процесами, з використанням синхронізації та моніторингу процесів обчислень.

### Основна частина роботи

Для організації обміну даними між окремими процесами з використанням бібліотеки MPI використовуються функції прийому та передачі повідомлень; ці функції бувають двох типів: з блокуванням та без блокування. Можливе суміщення функцій передачі та прийому.

Використовуються також функції колективної взаємодії процесів.

Передача повідомлення від точки до точки здійснюється за певним протоколом через буфер. При цьому важливо коректно встановлювати параметри функцій передачі MPI\_Send, MPI\_Isend і прийому MPI\_Recv, MPI\_Irecv і режиму роботи процедури, що реалізує протокол. Можливі різні режими на передавальній та приймальній стороні.

Великий інтерес представляє суміщена функція передачі/прийому MPI\_Sendrecv, яка використовує двоступінчасту пам'ять буфера.

При організації процесів, що протікають одночасно, важливо забезпечити різні види їхньої колективної взаємодії: MPI\_Bcast (один-багатьом); MPI\_Gather (багато-одному).

Зазначені особливості пересилання даних спрямовані на мінімізацію часу взаємодії джерела та приймача.

На рисунку 1 показана структура команд MPI.

До загальних процедур відносяться функції, які використовуються в будь-якому, навіть найкоротшому застосунку MPI. Займаються вони не так власне передачею даних, як її забезпеченням [8, с. 146; 9, р. 2].

Найпростіший тип зв'язку між завданнями: одна гілка викликає функцію передачі, а інша –

функцію прийому. Набір функцій для організації прийому-передачі даних між окремими процесами є найчисленнішим.

Під терміном "колективні" у MPI маються на увазі три групи функцій: функції колективного обміну даними, точки синхронізації (бар'єри), функції підтримки розподілених операцій.

Область зв'язку – абстрактне поняття, що дозволяє вказати, чи є певне завдання абонентом області зв'язку. Комуникатор, або описувач галузі зв'язку – це верхівка тришарового пирога (групи, області зв'язку, описники областей зв'язку), з яким працюють завдання.

Розглянемо деякі базові паралельні обчислювальні процеси та формалізуємо для них використання засобів бібліотеки MPI [10, с. 1; 11, с. 3].

На рисунку 2 показана схема алгоритму для процесу «Визначення кількості завдань у запущеному застосунку». Для початку та завершення процесу використано MPI\_Init та MPI\_Finalize. Визначення кількості завдань у застосунку та порядкового номера завдання виконано з використанням MPI\_Comm\_size та MPI\_Comm\_rank.

На рисунку 3 наведена схема створення комуникатора-дуплікату для надійного поділу потоків повідомлень. Алгоритм містить загальну та змістовну частини. Використано змінений підхід до обробки помилок через MPI\_Abort та MPI\_Barrier. Хоча для повідомлень обрано той самий ідентифікатор, описувачі області зв'язку є різними. Після завершення роботи повідомляємо MPI, що більше комуникатором не користуємося. Після цього myComm буде скинуто в MPI\_COMM\_NULL (тобто в 0), а відповідні дані будуть помічені на видалення.

**Висновки.** У роботі проведено формалізацію технологій паралельних обчислень для організації взаємодії обчислювальних процесів. Визначено ефективність паралельних обчислень з використанням функцій прийому та передачі повідомлень бібліотеки MPI. Систематизовано структуру команд MPI, виділено загальні процедури, функції для організації прийому-передачі даних між обчислювальними процесами, колективні функції та набір функцій, що працює з комуникаторами, групами та областями зв'язку.

### Список літератури:

1. Технології паралельних обчислень : навчальний посібник / Семеренко В. П. Вінниця : ВНТУ, 2018. 104 с.
2. Hemanth D., Elhosney M., Nguyen Tu, Lakshmanan S. *Advances in Parallel Computing Technologies and Applications*. 2021. 52 p.
3. Rodriguez C., Rivera M., Diaz-Cacho M., Portela J. Parallel computing technologies in video stabilization for teaching purposes. *Conference: XL Jornadas de Automatica*. 2019. Pp. 836–841.

4. Jin B., Wang Y., Liu X., Bai Q., Zhang H., Gao Y. Parallel Computation Technology for Distributed Optical Fiber Sensing System. *Conference: 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium*. 2019. Pp. 1584–1587.
5. Zigunovs Maksims. Implementation of the difference scheme for absorption equation type problems applying parallel computing technologies. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Environment. Technologies. Resources*. Vol. 2. 2021. Pp. 210–213.
6. Розподілені обчислення : навчальний посібник / Паулін О. М. Одеса : Одеська політехніка, 2022. 62 с.
7. Atayan A. Solving the diffusion-convection problem using MPI parallel computing technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 1902(1):012098. 2021. Pp. 1–12.
8. Tuama, Bilal. Empirical Performance Evaluation of Gaussian Elimination and Parallel Implicit Elimination with Parallel Computing Technologies. *Conference: 2018 1st Annual International Conference on Information and Sciences (AiCIS)*. 2018. Pp. 146–151.
9. Zou Y., Zhu Y., Li Y., Wu F., Wang J. Parallel computing for genome sequence processing. *Briefings in bioinformatics*. 2021. Pp. 26.
10. Yelick K., Buluc A., Awan M., Azad A., Brock B., Egan R., Ekanayake S., Ellis M., Georganas E., Guidi G., Hofmeyr S., Selvitopi R., Teodoropol C., Olikier L. The parallelism motifs of genomic data analysis. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2020. 378. 20190394. Pp. 1–11.
11. V. Gligorijevic, P. D. Renfrew, T. Kosciolk, J. K. Leman, K. Cho, T. Vatanen, D. Berenberg, B. C. Taylor, I. M. Fisk, R. J. Xavier et al. “Structure-based function prediction using graph convolutional networks,” *Preprint, p. BioRxiv:786236*, October 2021. Pp. 1–9.

#### **Zinovatna S.L., Tishakin N.V., Budzhelida A.N. APPLICATION OF PARALLEL COMPUTING TECHNOLOGIES FOR ORGANIZATION OF PROCESS INTERACTION**

*Data processing processes in complex information systems require the simultaneous implementation of several operations – parallel computing. The implementation of parallel computing can be performed in two ways: by introducing redundancy of independently operating elements of the computer system and using computational technologies of parallel execution, when several different data processing commands are executed simultaneously. To perform parallel calculations in the presence of allocated memory and several independently running processors, the interaction between the processors is carried out using the data transmission interface MPI – Message Passing Interface. According to traditional parallel computing, to distribute independent computational fragments between different processors, it is necessary to create a software implementation of these fragments and place them on the appropriate processors. The MPI data transmission interface simplifies the solution of the problem of computational parallelism: only one program is created, which is run on all existing processors in the computer system. This corresponds to the Single Program Multiple Processes (SPMP) model. The paper considers the efficiency of parallel computing using the functions of receiving and transmitting messages of the MPI library. The structure of MPI commands is systematized, the general procedures, functions for the organization of data reception and transfer between computing processes, collective functions and a set of functions working with communicators, groups and communication areas are allocated.*

*Processes have been formalized to determine the actual number of tasks in a running application and to create a duplicate communicator for reliable separation of message flows. Schemes of algorithms are created for both processes, which are commented according to the used methods of the MPI library. MPI\_Init and MPI\_Finalize were used to start and end the process. The number of tasks in the application and the sequence number of the task were determined using MPI\_Comm\_size and MPI\_Comm\_rank. When creating a duplicate communicator for reliable separation of message flows, a changed approach to error handling via MPI\_Abort and MPI\_Barrier was used.*

**Key words:** distributed computing, parallel processes, processor, data interface, MPI library, command structure, algorithm scheme.

УДК 681.5.015.23:681.5.015.24  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/16>

**Кондратець В.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Мелешко Є.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Мацуї А.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Абашина А.А.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## СТАБІЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РІЗНОРОЗМІРНОГО КУЛЬОВОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА РЕАЛІЗАЦІЄЮ АЛГОРИТМІВ ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО СТАНУ

*В наслідок низького значення к.к.д. кульових млинів, особливо в перших стадіях рудопідготовки на збагачувальних фабриках, продуктивність подрібнення сировини є порівняно низькою. Вихід з цієї ситуації можливо відшукувати в удосконаленні керованого об'єкта – кульового млина в частині його молочної середовища та у переведенні системи на сучасний інформаційний рівень. Дослідження здійснені в межах виконання теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах», яка входить до наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. Тому тема статті є актуальною. Метою даної роботи є підвищення продуктивності кульового млина першої стадії рудопідготовки на збагачувальних фабриках. При виконанні досліджень використано метод порівняння, аналізу, методи теорії кульових млинів, теорії автоматичного управління, інформатики, програмування, складання алгоритмів. Запропоновано спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів і математичну модель оцінювання спрацювання куль за витратою енергії на подрібнення заданого обсягу руди, яка відрізняється достатньо високою точністю. Розроблена математична модель у вигляді 15 алгебраїчних залежностей для визначення кількості різнорозмірних куль у циклі завантаження їх у млин. Розроблено алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження та алгоритмічну схему виконання операцій завантаження куль у млин. Запропоновані дві математичні моделі і два алгоритми дозволяють створити систему стабілізації оптимального багаторозмірного кульового завантаження нового типу. Система стабілізації оптимального кульового завантаження в млині, яку можливо створити на базі виконаних досліджень, в процесі експлуатації дозволяє реалізувати переваги розробленого прогресивного молочної середовища. Практична значущість проведених досліджень міститься у значному до 95,44% підвищенні продуктивності подрібнення сировини та економії електроенергії і матеріальних ресурсів.*

**Ключові слова:** млин, оптимальне різнорозмірне кульове завантаження, стабілізація, алгоритми, довантаження.

**Постановка проблеми.** Продуктивність подрібнення сировини кульовими млинами на рудозбагачувальних фабриках є порівняно низькою. Підвищення показника потребує переведення системи керування кульовим завантаженням на сучасний інформаційний рівень. Дані дослідження здійснені в межах реалізації теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942), яка є складовою плану наукової

тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. З врахуванням сказаного тема запропонованої наукової статті є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Починаючи з 70-х років минулого століття проблему керування кульовим завантаженням млинів розв'язують різними шляхами. Одним з перших використано принцип тимчасового керування, який застосовують і в теперішній час. При цьому певна кількість куль завантажується в млин через

встановлений інтервал часу – здебільшого через добу. Певна ефективність досягається при стабілізації вихідного живлення рудою. Якщо рудна продуктивність змінюється, то використовують принцип слідкування за кількістю подрібненої руди. Однак ці два підходи не забезпечують необхідну точність підтримання обсягу кульового завантаження. Згодом завантаження куль в млини почали здійснювати за енергетичними параметрами приводного електродвигуна – спочатку використовували засоби контролю активного струму статора електродвигуна кульового млина, згодом активної потужності. В цей же час розроблялися засоби керування з іншими підходами, які не забезпечили очікуваного ефекту. Удосконалювати продовжили пристрої, що базуються на вимірюванні активної потужності приводних двигунів [1–3], однак це не дало суттєвого підвищення точності вимірювання кульового завантаження. Сам принцип визначення завантаження кульового млина кулями не відрізняється високою точністю у випадку вимірювання активної потужності. Похибка оцінювання параметра складає 10-25 % [4].

Інший шлях оцінювання активної потужності – це використання відомої формули потужності для її визначення розрахунковим підходом. Наприклад, для водоспадного режиму роботи кульового млина можливо використати залежність (159), яку приведено в [5, с.296]. Однак цей параметр дуже точно отримати не можливо внаслідок зміни маси куль, ступеню заповнення барабана молотильними тілами, внутрішнього діаметра барабана, швидкості його обертання відносно критичного значення і сталості, яка визначається відношенням радіусів зовнішнього та внутрішнього радіусів руху куль у барабані. Крім того, до даної формули потужності не входять параметри руди – міцність, об'єм, крупність. Ця ж формула значно завищує значення потужності в наслідок того, що при падінні кульового завантаження відбувається «віддача» частини енергії на обертання барабана технологічного агрегату. Частку загальної енергії, що складає «віддачу» точно встановити не вдається. З розглянутого видно, що цей підхід також має велику похибку визначення обсягу кульового завантаження млина.

Отже, в теперішній час не існує альтернативи недосконалому часовому принципу керування станом кульового завантаження млинів першої стадії рудопідготовки збагачувальних фабрик і його вимушені застосовувати, втрачаючи продуктивність, перевитрачаючи електроенергію,

куль і футерівку. Тому задача удосконалення контролю та керування станом кульового завантаження млинів є актуальною і потребує подальшого дослідження.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є підвищення продуктивності кульового млина першої стадії рудопідготовки на збагачувальних фабриках шляхом переведення системи керування кульовим завантаженням на сучасний інформаційний рівень.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що різнорозмірне кульове завантаження забезпечує суттєве зростання продуктивності кульового млина, яка може досягати 10-15%. Оскільки є і інші фактори впливу на продуктивність технологічного агрегату з боку молотильного середовища, то можливо вести мову про оптимальне різнорозмірне кульове завантаження. Один з його варіантів може бути таким: вміст куль діаметром 50 мм (18%), 65 мм (23%), 75 мм (27%), 90 мм (32%).

При роботі кульового млина оптимальне різнорозмірне кульове завантаження необхідно зберігати автоматичною стабілізацією його обсягу і складу. Встановлено, що відомі підходи підтримання заданого кульового завантаження в млинах не відповідають технологічним вимогам. Тому розв'язати цю задачу можливо реалізацією запропонованого більш ефективного підходу стабілізації кульового завантаження за корисно витраченою енергією, яка враховує всі показники процесу подрібнення руди і на неї не впливають збурюючі фактори, що роблять таку операцію нездійсненною. Тут доцільно перейти до віртуального оцінювання стану оптимального кульового завантаження за відомою в теорії кульових млинів залежністю корисно витраченої енергії на подрібнення певного обсягу руди, яка може слугувати математичною моделлю [6]. Новий, прогресивний підхід оцінювання стану молотильного середовища кульового млина захищено патентом на винахід № 122994 на «Спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів» [7]. Він відрізняється тим, що попередньо вимірюють миттєві значення витрати вихідної руди, середньозважених крупностей вихідної руди і продукту у розвантаженні кульового млина, інтегрують їх значення впродовж часу набору заданого значення кількості руди, осереднені середньозважені крупності продуктів переводять у середні геометричні зважені крупності, витрачену енергію на подрібнення руди визначають за формулою

$$E = A \cdot K_{\phi} \left( \frac{1}{d_{cr}} - \frac{1}{D_{cr}} \right) Q_3, \text{ кВт}\cdot\text{г}, \quad (1)$$

де  $A$  – незмінний для даних умов подрібнення коефіцієнт;  $K_{\phi}$  – коефіцієнт, що враховує частку спрацювання футеровки порівняно зі зносом куль, що визначають експериментально;  $d_{cr}$ ,  $D_{cr}$  – відповідно середні гармонічні зважені крупності матеріалу в розвантаженні млина і вихідному живленні рудою;  $Q_3$  – задане значення набору маси подрібненої руди, а кульове завантаження млина знаходять як різницю оптимального значення і витраченої на подрібнення встановленого обсягу руди енергії, поділеної на норматив витраченої енергії на спрацювання одиниці маси куль в установленому режимі подрібнення в тому ж технологічному агрегаті на тому ж технологічному різнотипі руди, який визначають експериментально.

Даний підхід автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів порівняно з відомим відрізняється високою точністю знаходження технологічного показника, оскільки в ньому замість визначення абсолютного значення кульового завантаження за активною потужністю електроприводу млина в точці екстремуму, де низька чутливість до кількості куль, а потужність вимірюється з низькою точністю, знаходиться з високою точністю корисно витрачена енергія на подрібнення заданої кількості матеріалу, враховуючи, що в запропонованій залежності  $A$  і  $K_{\phi}$  є константами, витрата руди вимірюється конвеєрними вагами з відносною похибкою менше  $\pm 1\%$ , а крупності в даних умовах визначаються також з достатньо високою точністю завдяки стабілізації параметрів осереднення випадкових сигналів впродовж тривалого часу, що складає не менше однієї години. Пристроями вимірюється середньозважена крупність вихідної руди і розвантаження кульового млина, а в математичну модель  $E$  входять середні гармонічні зважені крупності матеріалів. Відомо, що між цими крупностями існує аналітичний зв'язок. Він не є функціональним, оскільки визначається характеристикою крупності сипкого матеріалу. Однак в межах конкретного сипкого матеріалу, наприклад вихідної руди, пісків механічного односпірального класифікатора, розвантаження кульового млина, зливу односпірального класифікатора при певному технологічному різнотипні руди і обладнанні це буде практично функціональна залежність [8]. Існуючий кореляційний зв'язок, майже функціональний, між цими параметрами підтверджено в промислових експериментах даної технологічної схеми [9]. Отже, висока точність запропонованого підходу є гарантованою.

Запропонована математична модель (1) визначення величини корисно витраченої енергії на подрібнення руди в кульовому млині дозволяє дещо спростити підхід довантаження куль і підвищити точність, оскільки енергетичний показник витрати куль є самим стійким. Корисно витрачена енергія на подрібнення руди передбачає певне спрацювання куль в даному процесі. Вона не залежить від крупності матеріалу, а спрацювання куль залежить від їх розміру.

Використовуючи енергетичний параметр в експерименті спрацювання куль можливо визначити навіть за одну добу. При цьому необхідно кульовий млин з новою футерівкою і нормативним оптимальним різнорозмірним кульовим завантаженням жити певним технологічним різнотипом руди встановленої крупності впродовж доби, витримуючи задане розрідження пульпи. Після такого спрацювання куль знаходять загальну масу пустого барабана, кульового завантаження і масу куль різного розміру. Використовуючи значення цих мас до експерименту, визначають спрацювання куль  $\Delta G_E$ , футерівки  $\Delta G_{\phi}$ , подрібнюючих тіл у кожному класі крупності –  $\Delta G_{E1}$ ,  $\Delta G_{E2}$ ,  $\Delta G_{E3}$  і  $\Delta G_{E4}$ . Віднісши ці дані до кількості  $E$  витраченої енергії визначають питомі витрати кульового матеріалу на 1 кВт·г корисно витраченої енергії, отримуючи конкретні дані –  $\Delta q_k = \Delta G_E / E$ , кг/т;  $\Delta q_{\phi} = \Delta G_{\phi} / E$ ;  $\Delta q_{E1} = \Delta G_{E1} / E$ ;  $\Delta q_{E2} = \Delta G_{E2} / E$ ;  $\Delta q_{E3} = \Delta G_{E3} / E$ ;  $\Delta q_{E4} = \Delta G_{E4} / E$ . Визначені питомі втрати кульового матеріалу і матеріалу футерівки будуть незмінними в процесі експлуатації, оскільки технологічний різнотип руди і матеріали та технології виготовлення куль і футерівки не змінюються. Відомо, що спрацювання футерівки млина залежить від крупності куль, однак в умовах стабілізації оптимального молольного середовища такий фактор впливати не буде.

Кулі в млин додавати бажано достатньо часто, наприклад через годину. Враховуючи математичну модель (1) цикл завантаження повинен дорівнювати певній кількості поданої в технологічний агрегат руди, наприклад 165 т, що наближено відповідає для даного кульового млина одній годині роботи. Разом з початком відліку маси руди, що завантажується у кульовий млин, необхідно здійснювати відлік середньозваженого розміру вихідної руди і розвантаження кульового млина. Відліки припиняють за сигналом конвеєрних вагів при досягненні 165 т. За кількістю виконаних вимірів знаходять осереднені значення  $d_{cr}$  розвантаження кульового млина і  $D_{cr}$  вихідної руди. Відповідно запропонованій математичній моделі (1)

за  $d_{CP}$ ,  $D_{CP}$  і  $Q_3$  знаходять кількість корисно витраченої енергії на подрібнення  $Q_3=165$  т руди з  $d_{CP}$  і  $D_{CP}$ . Потім визначають масу спрацьованих куль

$$\Delta G_E = \Delta q_k \cdot E \quad (2)$$

та їх спрацювання за розмірами

$$\Delta G_{E1} = \Delta q_{E1} \cdot E, \quad (3)$$

$$\Delta G_{E2} = \Delta q_{E2} \cdot E, \quad (4)$$

$$\Delta G_{E3} = \Delta q_{E3} \cdot E, \quad (5)$$

$$\Delta G_{E4} = \Delta q_{E4} \cdot E. \quad (6)$$

Аналогічно знаходять масу спрацьованої футеровки

$$\Delta G_\phi = \Delta q_\phi \cdot E, \quad (7)$$

а масу спрацьованої футерівки, яку необхідно замінити кулями, знаходять за виразом  $\Delta G_{\phi1} = \phi \cdot \Delta G_\phi$ . У загальному випадку ще буде виведено з кульового млина скрап  $\Delta G_C$ . Він також створений з усіх спрацьованих куль, але повністю не переніс свою масу на корисну роботу. Тому його також необхідно замінити різнорозмірними кулями.

В цілому різнорозмірними кулями необхідно замінити результуючу масу спрацьованого металу на корисно витрачену енергію при подрібненні  $Q_3$  руди. Маса спрацьованого металу буде дорівнювати

$$G_{PCM} = \Delta G_E + \Delta G_{\phi1} + \Delta G_C. \quad (8)$$

Результуюча спрацьована маса металу з заданим розміром куль розподілиться відповідно їх вмісту в оптимальному кульовому завантаженні

$$G_{50} = 0,18G_{PCM}, \quad (9)$$

$$G_{65} = 0,23G_{PCM}, \quad (10)$$

$$G_{75} = 0,27G_{PCM}, \quad (11)$$

$$G_{90} = 0,32G_{PCM}. \quad (12)$$

Кількість куль, які повинні ввійти в цикл завантаження, дорівнює

$$n_{50} = G_{50}/0,510 + \Delta G_{50}, \quad (13)$$

$$n_{65} = G_{65}/1,121 + \Delta G_{65}, \quad (14)$$

$$n_{75} = G_{75}/1,722 + \Delta G_{75}, \quad (15)$$

$$n_{90} = G_{90}/2,976 + \Delta G_{90}, \quad (16)$$

де 0,510; 1,121; 1,722; 2,976 – відповідно маси куль 50 мм, 65 мм, 75 мм і 90 мм в кг;  $\Delta G_{50}$ ,  $\Delta G_{65}$ ,  $\Delta G_{75}$ ,  $\Delta G_{90}$  – залишки маси, які менші маси однієї повної кулі і які необхідно врахувати в наступному циклі.

Отримані залежності (2)–(16) складають математичну модель знаходження кількості завантажуваних куль у циклі після подрібнення встановленої маси руди  $Q_3$ . Математична модель дозволяє

побудувати алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження. Він приведений на рис. 1. Алгоритмічну схему виконання операцій завантаження куль у млин наведено на рис. 2. Вона побудована на базі алгоритму, розглянутому на рис. 1, і дозволяє створити інформаційно-керуючий блок завантаження у млин різнорозмірних куль на заміну спрацьованого металу.

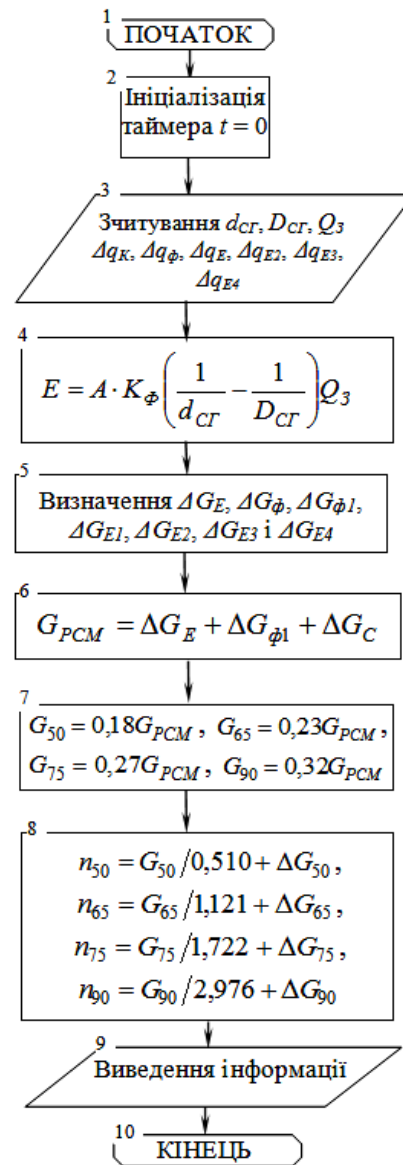


Рис. 1. Алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження

Порційна подача різнорозмірних куль у технологічний агрегат потребує живильного пристрою, однак таких засобів в даний час не існує. Тому з використанням багатоструминного магазинного завантажувального пристрою, приведену на рис. 7.21 [10, с. 93] розроблено багатоструминний пристрій з магазинами для різнорозмірних куль.

На сучасних кулях 5<sup>-ї</sup> групи міцності він може жити кульовий млин МШЦ 4,5×6,0 впродовж доби, двох діб і навіть чотирьох діб, залишаючись порівняно не громіздким [11].

Отже, багатострумнинний пристрій з магазинами для завантаження різнорозмірних куль і інформаційно-керуючий блок створюють систему стабілізації кульового завантаження в млині в процесі експлуатації.

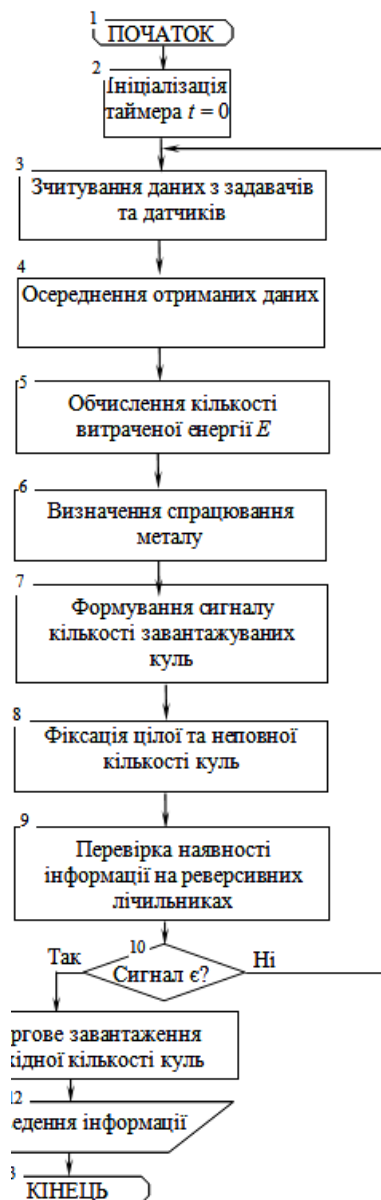


Рис. 2. Алгоритмічна схема виконання операцій завантаження куль у млин

**Висновки.** Таким чином, запропоновано спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабаних млинів, який базується на математичній моделі оцінювання витраченої на подрібнення встановленого обсягу руди корисної енергії за середніми гармонічними зваженими крупностями матеріалу в розвантаженні млина і вихідному живленні рудою, який за точністю значно перевищує відомі рішення.

Розроблено підхід визначення питомих витрат куль і футерівки на 1 кВт·г корисно затраченої енергії при подрібненні даного технологічного різнотипу руди впродовж встановленого часу роботи конкретного технологічного агрегату за результатами вагового оцінювання спрацювання куль і футерівки, розрахункового оцінювання корисно витраченої енергії та знаходження відношення спрацювань до корисно витраченої енергії, які є константами що слугують основою при керуванні кульовим завантаженням.

Вперше створено математичну модель знаходження кількості різнорозмірних куль у циклі завантаження після подрібнення встановленої маси руди, яка враховує корисно витрачену енергію, знайдену розрахунково, та питомі витрати металу на 1 кВт·г корисно витраченої енергії, які є константами в даному технологічному процесі.

Вперше розроблено алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження і алгоритмічну схему виконання операцій завантаження молотного середовища у технологічний агрегат на заміну спрацьованого металу, які є базою створення системи стабілізації оптимального різнорозмірного кульового завантаження млина першої стадії рудопідготовки.

Математичні моделі і алгоритми враховують аналітичні вирази, отримані без будь-яких допущень, експериментальні дослідження можливо здійснити з забезпеченням високої точності оцінювання величин, а система керування є дискретною, тому запропонований підхід стабілізації оптимального різнорозмірного кульового завантаження барабанного млина забезпечує високу точність.

Перспективою подальших досліджень є розробка апаратури, яка реалізує запропоновані математичні моделі та алгоритми.

#### Список літератури:

1. Daniel M. J. Measurement of electrical energy consumption in a Bond ball mill. *Proc. Of the XXIII Intern. Mineral Processing Congress*. 2006. Pp. 92–97.
2. Улитенко К. Я. Оптимизация шаровой загрузки барабанных мельниц по потребляемой мощности. *Обогащение руд*. 2008. № 5. С. 42–44.

3. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring / Pedrayes F. and other. *Powder Technology*. 2018. Vol. 323. P. 433–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.026.
4. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Киев, 1975. 240 с.
5. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва : Нед ра, 1980. 415 с.
6. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Віртуальне оцінювання стану оптимального кульового завантаження млина, що подрібнює руду збагачувальних фабрик. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 17–20 лист., 2020 р.). Кривий Ріг, 2020. С. 252.
7. Спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів: пат. 122994 Україна: МПК В02С 17/18, В02С 25/00, F23К 1/02, G01L 3/26. №а201909799; заявл. 13.09.19; опубл. 28.01.21, Бюл. № 4. 7 с.
8. Мацуї А. М., Кондратець В. О., Абашина А. А. Математичне моделювання зв'язку середньогармонічної зваженої крупності та середньозваженої крупності в технологічних процесах рудопідготовки. *Проблеми математичного моделювання* : матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. (Кам'янське, 25–28 трав. 2020 р.). Кам'янське, 2020. С. 6870.
9. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання середньозваженої крупності твердого в завантаженні кульового млина рудою і пісками класифікатора. *Математичне моделювання*. 2017. № 1 (36). С. 59–66.
10. Кондратець В. О. Системи керування технологічними та виробничими процесами і проектуванням. Ч. II. Київ : Вища школа, 1993. 256 с.
11. Matsui A.N., Kondratets V.A., Abashina A.A. Loading device for ball mills with different sized grinding bodies. *Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing* : Proceeding 2<sup>nd</sup> Intern. scien. and techn. intern. conf. (Petrosani, Romania, 18 Nov. 2019). Petrosani, 2019. P. 150–152.

**Kondratets V.O., Meleshko Ye.V., Matsui A.M., Abashina A.A. STABILIZATION OF THE OPTIMUM DIFFERENT-SIZED BALL LOADING OF A DRUM MILL BY THE IMPLEMENTATION OF ALGORITHMS FOR ASSESSING ITS CONDITION**

*As a result of the low efficiency of ball mills, especially in the first stages of ore preparation at concentrators, the productivity of grinding raw materials is relatively low. The way out of this situation can be found in the improvement of the control object – a ball mill in terms of its grinding environment and in the transfer of the system to the modern information level. The research was conducted within the framework of the theme "Optimization of ball mill productivity of ore and finished product with minimum energy and material overruns", which is included in the scientific topics of the Central Ukrainian National Technical University. Therefore, the topic of the article is relevant. The purpose of this work is to increase the productivity of the ball mill of the first stage of ore dressing at concentrators. In carrying out research used the method of comparison, analysis, methods of ball mill theory, automatic control theory, computer science, programming, compiling algorithms. A method of automatic determination of ball loading of drum mills and a mathematical model of ball wear estimation by energy consumption for grinding a given volume of ore, which has a high enough accuracy, are proposed. A mathematical model in the form of 15 algebraic dependences for determining the number of balls of different sizes in the cycle of loading them into the mill is developed. An algorithm for determining the number of balls of different sizes in the loading cycle and an algorithmic scheme of loading operations of balls into the mill is developed. The proposed two mathematical models and two algorithms make it possible to create a stabilization system for the optimal multi-size ball loading of a new type. The system of stabilization of optimal ball loading in the mill, which can be created on the basis of the performed research in operation, allows to realize the advantages of the developed progressive grinding media. The practical significance of the conducted research lies in the significant up to 95,44% increase in productivity of grinding raw materials and savings in energy and material resources.*

**Key words:** mill, optimal different-sized ball loading, stabilization, algorithms, extra load.



УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/17>

**Лисенко О.І.**

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

**Чумаченко С.М.**

Національний університет харчових технологій

**Явіся В.С.**

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

**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Новіков В.І.**

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

**Сушин І.О.**

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

## **МОДЕЛІ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ВІД МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ В АЛГОРИТМАХ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ УСКЛАДНЕНИХ ТЕХНОГЕННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

*Сформульовано новий підхід, який забезпечує представлення об'єктивної та комплексної кількісної й якісної інформації про рівень екологічної безпеки екосистем на контрольованих об'єктах, територіях і зонах у формі, придатній для використання в системах підтримки прийняття рішень. Запропонований підхід дозволяє найкращим чином використовувати унікальні інформаційні можливості мобільних безпроводових сенсорних мереж в інтересах моніторингу екологічного стану навколишнього природного середовища. Мобільна безпроводова сенсорна мережа може функціонувати на не підготовлених ландшафтах і проводити спостереження за зооценозом та мігруючими факторами техногенного впливу. Мобільна безпроводова сенсорна мережа розглядається як джерело первинної інформації про вектор стану екологічної системи регіону, математична модель якої описується звичайними лінійними нестационарними рівняннями, де в якості алгоритмічного спостерігача стану запропоновано використовувати спостерігач Льюїнбергера. За допомогою спостерігача Льюїнбергера можна покомпонентно оцінити стан екосистеми. В результаті доповнення алгоритму спостерігача Льюїнбергера блоками ідентифікації екологічних процесів, зовнішніх впливів та поширення забруднень отримано структуру імітаційної моделі, яку доцільно використовувати на етапі прогнозного моделювання техногенного впливу та реабілітаційних заходів на навколишнє природне середовище регіону. Запропоновано підхід, який зводить задачу про оцінювання стану екологічної системи, ускладненої техногенним навантаженням, до розв'язання математичної задачі про спостерігаємість системи. Розроблено пропозиції щодо розв'язання задачі побудови структурних схем моделей використанням мобільних безпроводових сенсорних мереж для інформаційного забезпечення алгоритмів оцінювання та прогнозування стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням. Запропонований підхід дозволяє застосувати розвинений математичний апарат системних досліджень, який широко використовується у сучасній теорії керування складними системами, в задачах математичної екології.*

**Ключові слова:** безпроводова сенсорна мережа, мобільна безпроводова сенсорна мережа, спостерігач Льюїнбергера, оцінювання та прогнозування стану екологічної системи, інформаційна технологія.

**Вступ**

При розробці математичних моделей оцінки та прогнозування екологічного стану навколишнього природного середовища, що призначені для використання в експертно-моделюючих системах прийняття рішення стосовно екологічної безпеки територій, що перебувають під інтенсивним техногенним навантаженням, необхідно мати на увазі, що інформація про стан і якість екосистем (їх окремих компонентів), є різною за своєю природою, розмірностями, ступенем повноти і ступенем значимості. Ця інформація має просторово-часовий розподіл і в ієрархічному плані відноситься до різних рівнів вертикальної шкали систем екологічного моніторингу.

Математичні моделі, що застосовуються на теперішній час, базуються переважно на оцінці екологічного стану і якості головних природних компонентів (атмосферне повітря, вода, ґрунт), що засновані переважно на „забруднюючому-ресурсному” підході, який спирається на нормативні гранично допустимі концентрації (ГДК), гранично допустимі викиди (ГДВ), гранично допустимі скиди (ГДС) і використовують прості співвідношення між вимірним значенням концентрації будь-якої забруднюючої речовини та значеннями її ГДК, ГДВ, ГДС [1].

Цей підхід має свої обмеження і не дає можливості комплексно й об’єктивно оцінити екологічний стан і якість досліджуваних об’єктів, а значить і їхній рівень екологічної безпеки. Пояснюється це тим, що в рамках цього підходу розглядається і оцінюється стан об’єкта, який обумовлено, в основному, хімічною складовою забруднення, що недостатньо повно відображає стан навколишнього природного середовища (НПС) і практично не містить даних за напрямками оцінки та прогнозування властивостей, процесів і явищ.

У зв’язку з цим необхідно використовувати нові науково-методичні принципи організації контролю і оцінки рівня екологічної безпеки контрольованих територій, які засновані на новому екологічному світогляді, що спирається на синергетичний (системний) підхід і нові інфотелекомунікаційні технології (зокрема технології 5G та 6G у купі із технологіями туманних та хмарних обчислень і технологіями стаціонарних та мобільних безпроводових сенсорних мереж).

Новий підхід забезпечує представлення об’єктивної та комплексної кількісної й якісної інформації про рівень екологічної безпеки екосистем на контрольованих об’єктах, територіях і зонах у формі, придатній для використання в системах підтримки прийняття рішень.

Застосування нових способів і технологій підготовки інформації для систем підтримки прийняття рішень і нових форматів представлення екологічної інформації з використанням стаціонарних та мобільних безпроводових сенсорних мереж дозволить підвищити ефективність прийнятих рішень, знизити ризик помилкових фінансових витрат.

Враховуючи, що у зоні надзвичайної ситуації стаціонарні сенсорні мережі, за звичай, будуть пошкоджені, стає зрозумілим той факт, що найбільш доцільно отримувати оперативну первинну інформацію про стан екосистеми із використанням мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ)[1–8].

Таким чином постає задача вдосконалення інформаційної технології оцінювання та прогнозування стану наземних екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням, з точки зору формулювання моделі (концептуального підходу) до формування способу підключення МБСМ до алгоритмів оцінювання та прогнозування.

**Постановка задачі дослідження**

Математична постановка задачі оцінки та прогнозування стану екосистеми, що перебуває під впливом техногенного навантаження (екосистема ускладнена техногенним навантаженням) може бути зведена до задачі про спостережіємість як у неперервній, так в дискретній постановці [9].

На практиці доцільність використання неперервної або дискретної за часом моделі визначається в основному зручністю, наочністю та доступністю дослідження та перевагою якісних міркувань (неперервна модель) або кількісних оцінок (дискретна модель). Якщо інтервал моделювання  $T_M$  набагато перевищує інтервал дискретизації  $T_0$ , тоді зручно використовувати при ідентифікації і при моделюванні неперервну модель (наприклад: а) –  $T_0=1$  доба,  $T_M>1$  рік; б) –  $T_0 \in [10, \dots, 30]$  діб,  $T_M > n \times 10$  років). У протилежному випадку, коли  $T_0 \approx n$  місяців, а  $T_M \approx n$  років, зручно (і правомірно) використовувати дискретну у часі модель. Підкреслимо, що в окремі дискретні моменти часу, які співпадають із сезонними (наприклад, річними) циклами підвищення техногенного навантаження, значення вектору стану неперервної та дискретної моделей співпадають. При цьому в проміжках між дискретними відліками часу в неперервній моделі здійснюється плавна інтерполяція. Обґрунтованість плавної інтерполяції підтверджується практичними спостереженнями, в яких були зафіксовані лише

випадки плавного поступового самовідновлення складових вектору стану екосистеми [10].

Розв'язання задачі про спостерегаємість наземної екосистеми у термінах системних досліджень теорії автоматичного керування дозволяє з'ясувати наявність або відсутність можливості оцінити та спрогнозувати всі компоненти вектору стану наземної екосистеми, але не дає зручну процедуру для отримання такої оцінки та прогнозу.

Таким чином, постає задача пошуку моделі інформаційно-алгоритмічної структури, яка дозволяє побудувати процедуру оперативного оцінювання та прогнозування компонент вектору стану наземної екосистеми ускладненої техногенним навантаженням.

**Метою даної статті є:** розробка пропозицій щодо розв'язання задачі побудови структурних схем моделей використання МБСМ для інформаційного забезпечення алгоритмів оцінювання та прогнозування стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням.

Викладення основного матеріалу

Математичну модель екосистеми ускладненої техногенним навантаженням представимо у вигляді системи рівнянь у відхиленнях біомас продуцентів, субстратів та консументів  $X(t)$ , що відбуваються біля точки стійкої рівноваги екосистеми (тобто, поблизу того стану коли екосистема, ще не зазнала техногенного впливу) [11–14]:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + \Delta\Omega(t) + \Delta W(t) + \Delta U(t), \quad (1)$$

де  $A(t)$  – квадратна матриця розміром  $n \times n$ , елементи якої залежать від змінного у часі рівня забруднення, викликаного техногенним впливом;  $\Delta\Omega(t)$ ,  $\Delta W(t)$ ,  $\Delta U(t)$  – матриці-стовпці розміром  $n \times 1$ , що складені з відхилень відповідних елементів  $\Delta\Omega(t)$ ,  $\Delta W(t)$ ,  $\Delta U(t)$ , які характеризують вплив на відповідні компоненти математичної моделі екосистеми погоднокліматичних факторів, уражаючих факторів техногенного навантаження (моделюється імпульсним впливом, яке стрибкоподібно переводить систему до нового положення за відповідною координатою), відновлювальних (реабілітаційних) природоохоронних заходів (складається із суми природних (зовнішня міграція та sukcesія) та штучних відновлювальних заходів).

Вважаємо, що за станом екосистеми ведеться спостереження із використанням безпроводової сенсорної мережі [15; 16], яка дозволяє вимірювати інтенсивність забруднення та оцінювати (обраховувати) елементи матриці  $A(t)$ , а також вимірювати агреговані показники біомаси (наприклад, з використанням дистанційного зондування Землі (ДЗЗ)) у вигляді

$$Y = C(t) \cdot X, \quad (2)$$

де  $C(t)$  – матриця спостережень розміром  $m \times n$ .

Зауважимо, якщо побудована неперервна лінійна математична модель у вигляді (1), (2) та задано період дискретизації за часом  $T_0$ , то за допомогою відомих перетворень можна побудувати дискретну лінійну математичну модель [17]:

$$X(i+1) = A^*(i)X(i) + \Delta\Omega^*(i) + \Delta W^*(i) + \Delta U^*(i); \quad (3)$$

$$Y(i+1) = C^*(i)X(i); \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

де:

$$A^*(i) = \Phi(t_{i+1}, t_i),$$

$$\Delta\Omega^*(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\Phi(t_{i+1}, \tau) \Delta\Omega(\tau)) d\tau;$$

$$\Delta W^*(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\Phi(t_{i+1}, \tau) \Delta W(\tau)) d\tau;$$

$$\Delta U^*(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\Phi(t_{i+1}, \tau) \Delta U(\tau)) d\tau;$$

$$C^*(i) = C(t'_i) \cdot \Phi(t'_i, t_i), \quad t'_i \in [t_i, t_{i+1}],$$

$t_i, i = 0, 1, 2, \dots$  – дискретні моменти часу;

$\Phi(t, t_0)$  – перехідна матриця, яка є рішенням матричного диференційного рівняння

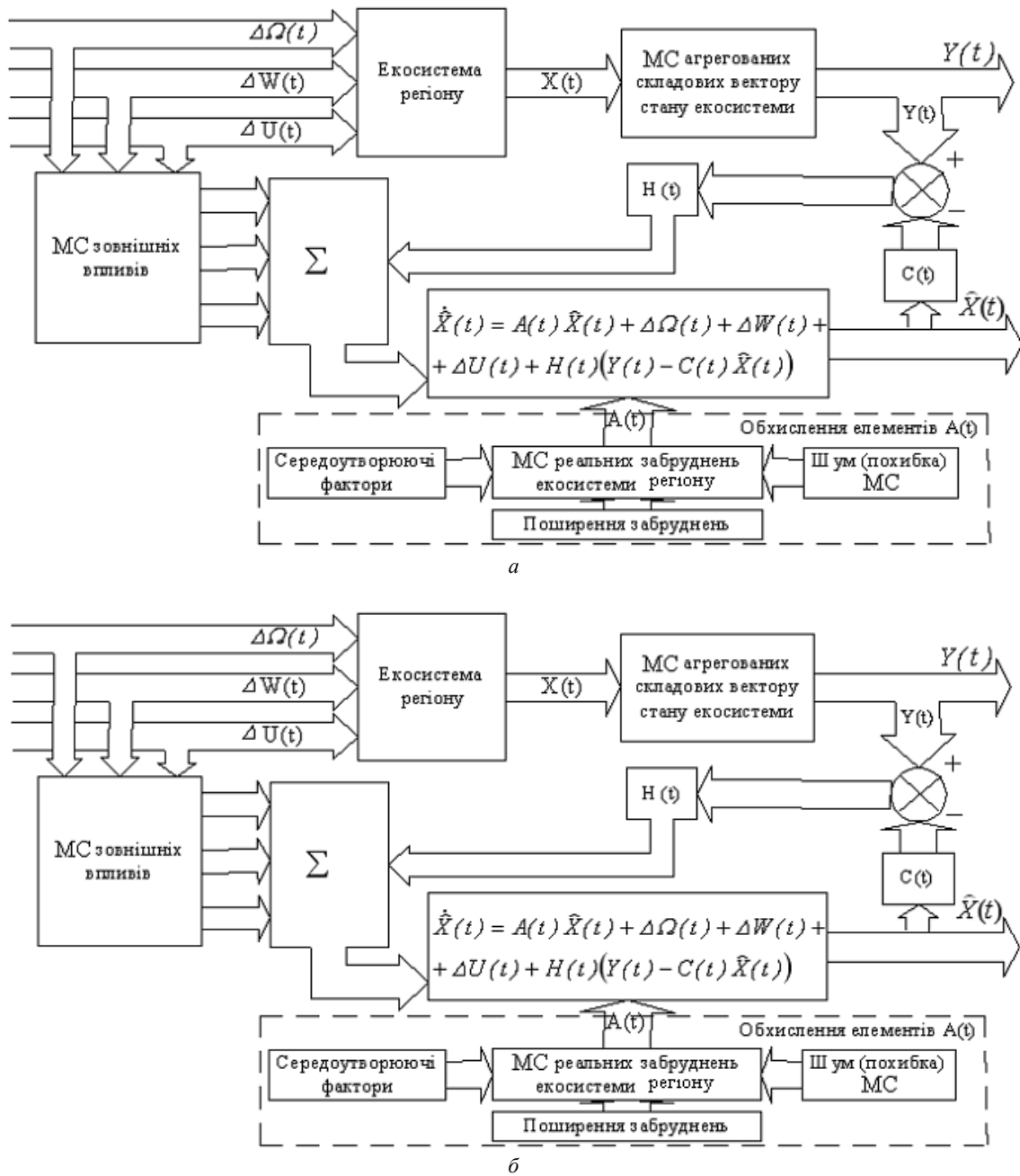
$$\frac{d}{dt} \Phi(t, t_0) = A(t) \cdot \Phi(t, t_0), \quad t > t_0,$$

де  $\Phi(t_0, t_0)$  – одинична матриця.

Для рішення задачі оцінювання та прогнозування кількісних значень усіх компонент вектору стану екосистеми пропонується використовувати алгоритм спостерігача Льюїнбергера [14].

За допомогою спостерігача Льюїнбергера (рис. 1) можна покомпонентно оцінити стан екосистеми. Якщо при побудові спостерігача враховувати неточності вимірювання (тобто шуми вимірювання), то спостерігач Льюїнбергера необхідно замінити оптимальним (квазіоптимальним) фільтром. Дану схему (див. рис. 1) доцільно застосовувати при оцінюванні вектору стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням.

Для реалізації схеми спостереження стану екосистеми, яка враховує нестационарність матриці  $A$ , необхідно провести додаткові дослідження щодо встановлення виду математичної залежності параметрів матриці  $A$  від компонент забруднення за всіма складовими вектора стану екосистеми. Після цього доповнити схему (див. рис. 1) блоком уточнення (ідентифікації) елементів матриці  $A$ . Для ідентифікації параметрів обраної математичної моделі підбирають найбільш зручний для розрахунку метод ідентифікації [18–21].



**Рис. 1. Модель підключення мобільних сенсорів (МС) мобільної безпроводової сенсорної мережі (МБСМ) до алгоритму спостерігача Льюїнбергера в задачі оцінки стану екосистеми:**  
 а – неперервний спостерігач, б – дискретний спостерігач;  $C(t)$ ,  $C^*(i)$  – матриця спостережень;  $Y(t)$ ,  $Y(i)$  – вектор спостережень;  $H(t)$ ,  $H(i)$  – матриця зворотного зв'язку (матриця вагових коефіцієнтів)

Матрицю  $H(t)$  або  $H(i)$  (див. рис. 1), у відповідності з теорією спостерігача Льюїнбергера [22], потрібно обирати так, щоб помилка

$$\Delta X(t) = X(t) - \hat{X}(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty \quad (5)$$

$$\text{або } \Delta X(i) = X(i) - \hat{X}(i) \rightarrow 0 \text{ при } i \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Враховуючи той факт, що на практиці виміри біотичних параметрів зазвичай виконуються з точністю  $\pm(10 \div 15) \%$  від абсолютних значень

вимірюваних величин, доцільно в спостерігачі Льюїнбергера при обчисленні  $H$  використовувати процедури обчислення матричного коефіцієнта підсилення оптимального фільтра в сталому режимі. При цьому припускаємо, що на вході формуючого фільтра теж діє збурюючий вінерівський процес. В якості безперервного або дискретного формуючих фільтрів розглядаються відповідно рівняння (1), (2) або (3), (4). Таким чином, запропонований в роботі спостерігач

Льюінбергера є стійким і набуває фільтруючих властивостей, але не є оптимальним з точки зору фільтрації Калмана.

Загалом спостерігач Льюінбергера використовується для відновлення детермінованих процесів. Але при вище поясненому визначені матричного коефіцієнта підсилення  $H$  його можна назвати фільтром Льюінбергера для біотичних процесів, тобто розглядати як прикладну модифікацію квазіоптимального фільтру.

**Підсумовуючи, робимо висновок**, що розв'язання задачі оцінки стану екосистеми зводиться до виконання наступних дій:

1. Аналізу, пошуку та обґрунтування технічної реалізуємості такого вектору спостереження, який забезпечує спостерігаємість екосистеми у розумінні виконання критеріїв спостерігаємість у вигляді [14; 17; 23]:

$$\text{rank} [\Pi_0^T, \Pi_1^T, \dots, \Pi_k^T, \dots, \Pi_{n-1}^T] = n, \quad (7)$$

де  $\Pi_0 = C(t)$ ,  $\Pi_k = \dot{\Pi}_{k-1} + \Pi_{k-1} A(t)$ ,  $k = \overline{1, n-1}$ , для моделі (1), (2)

або

$$\text{rank} [M(i_0, i_1)] = n, \quad (8)$$

де  $M(i_0; i_1) = \sum_{i=i_0+1}^{i_1} \Phi^{*T}(i, i_0+1) C^*(i)^T C(i) \Phi^*(i, i_0+1)$ ,

$\Phi^*(i, i_0)$  – перехідна матриця системи, яка є рішенням різницевого рівняння  $\Phi^*(i+1, i_0) = A^*(i) \Phi^*(i, i_0)$ ,  $i \geq i_0$ , де  $\Phi(i_0; i_0)$  – одинична матриця, для моделі (3), (4). (тобто необхідно розв'язати задачу спостерігаємість системи (1), (2) або (3), (4) з урахуванням технічних можливостей формування вектору спостережень  $Y(t)$  або  $Y(i)$ ).

2. Побудови такого алгоритму обробки вектору спостережень  $Y(t)$  або  $Y(i)$ , що забезпечує отримання оцінки всього вектору стану екосистеми  $X(t)$  або  $X(i)$ . Якщо для оцінки вектору стану використовувати алгоритм спостерігача Льюінбергера, то з математичної точки зору задача оцінки вектору стану зводиться до вибору матриці зворотного зв'язку  $H(t)$  або  $H(i)$  такої, щоб виконувалась умова (5) або (6).

Якщо доповнити схеми (див. рис. 1) блоками імітації екопроцесів у досліджуваному регіоні, зовнішніх впливів та поширення забруднень, отримаємо структурну схему прогнозно-імітаційної моделі, яку пропонується використовувати на етапі екологічного прогнозування впливів техногенного навантаження на екосистему регіону (рис. 2), тобто для розв'язання задачі

прогнозування стану екосистеми, функціонування якої ускладнено техногенним навантаженням [10].

Балансові моделі екосистеми [11–13] зручно використовувати в якості базових узагальнюючих моделей. Але вони не враховують специфічні особливості зооценозу із складу наземної екосистеми [14]. Для врахування особливостей зооценозу наземної екосистеми доцільно побудувати модель взаємодії  $n$ -видів із чисельностями  $N_i \geq N_0$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $N_i, N_0$  – натуральні числа, яка дозволяє побудувати математичні моделі зооценозу у вигляді узагальненої моделі системи Лотки-Вольтерри [24]:

$$\frac{dN_i}{dt} = q_i(N_i) \left( \varepsilon_i - \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} f_j(N_j) \right) + \Omega_i(t) + W_i(t) + U_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

де  $\varepsilon_i$  – швидкість природного приросту або смертності;

$\gamma_{ij} (i \neq j)$  – коефіцієнти, що відображають характер взаємодії видів;

$\gamma_{ii}$  – показники взаємодії всередині виду.

Прогнозуючи  $\overline{\quad}$  вхідні впливи  $\Omega_i(t), W_i(t), U_i(t), i = \overline{1, n}$  та вимірюючи початкові умови, за допомогою рівняння (9) знаходимо траєкторію переходу точки, що відображає у фазовому просторі прогнозоване положення зооценозу екосистеми. Виконавши поточну лінеаризацію (9) на цій траєкторії приходимо до рівнянь виду (1), (2), на базі яких виконуємо побудову спостерігача за схемою, що зображена на рис. 3.

Складність рішення задачі спостереження відхилень вектору стану системи (9) від прогнозованих значень полягає у тому, що вид функцій  $q_i(N_i), f_j(N_j)$  невідомий.

Для подолання проблеми неточності знання залежностей  $q_i(N_i)$  та  $f_j(N_j)$  можна, наприклад, використовувати наступні три способи:

1. Побудова спрощених залежностей  $q_i(N_i), f_j(N_j)$ .
2. Застосування алгоритмів поточної ідентифікації параметрів матриць  $A(t), C(t)$ .
3. Використання комбінованої процедури, що складається із двох алгоритмів: алгоритм аналітичного спрощення, який базується на припущенні щодо структури і параметрів функцій  $q_i(N_i), f_j(N_j)$ ; алгоритм поточної ідентифікації параметрів матриць  $A(t), C(t)$ .

Розглянемо перший спосіб – **спрощення**. Його суть полягає у тому, що узагальнена система Лотки-Вольтерри замінюється спрощеною системою Вольтерри

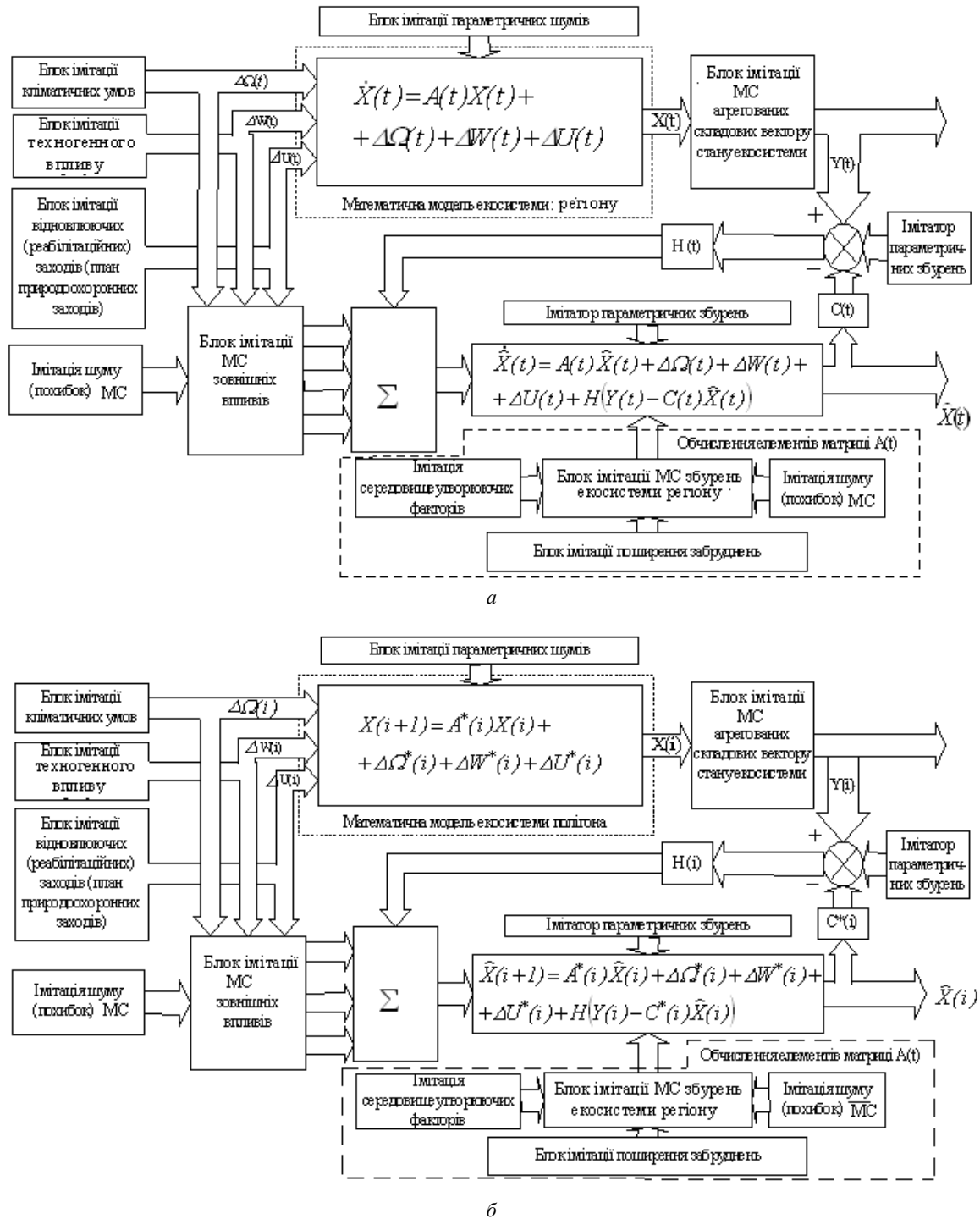


Рис. 2. Імітаційні моделі прогнозування стану екосистеми, ускладненої впливом техногенного навантаження  
 а) – неперервна модель; б) – дискретна модель,  $i \in \{0, 1, 2, \dots\}$ ; МС – мобільні сенсори із складу МБСМ

$$\frac{dN_i}{dt} = N_i \left( \varepsilon_i - \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} N_j \right) + \Omega_i(t) + W_i(t) + U_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

де зміст коефіцієнтів  $\varepsilon_i, \gamma_{ij}$  залишається таким же, як і для системи (9), у якій покладено, що  $q_i(N_i) = N_i, f_j(N_j) = N_j$ .

Суть другого способу – ідентифікаційного – полягає у тому, що в інтервалі часу відносного сталого функціонування екосистеми (визначається планом розвитку регіону) та з врахуванням сезонно-кліматичних (погодних) змін здійснюється оцінка абсолютних (номінальних) значень складових вектору стану його екосистеми і далі в процесі функціонування оцінюються (вимі-

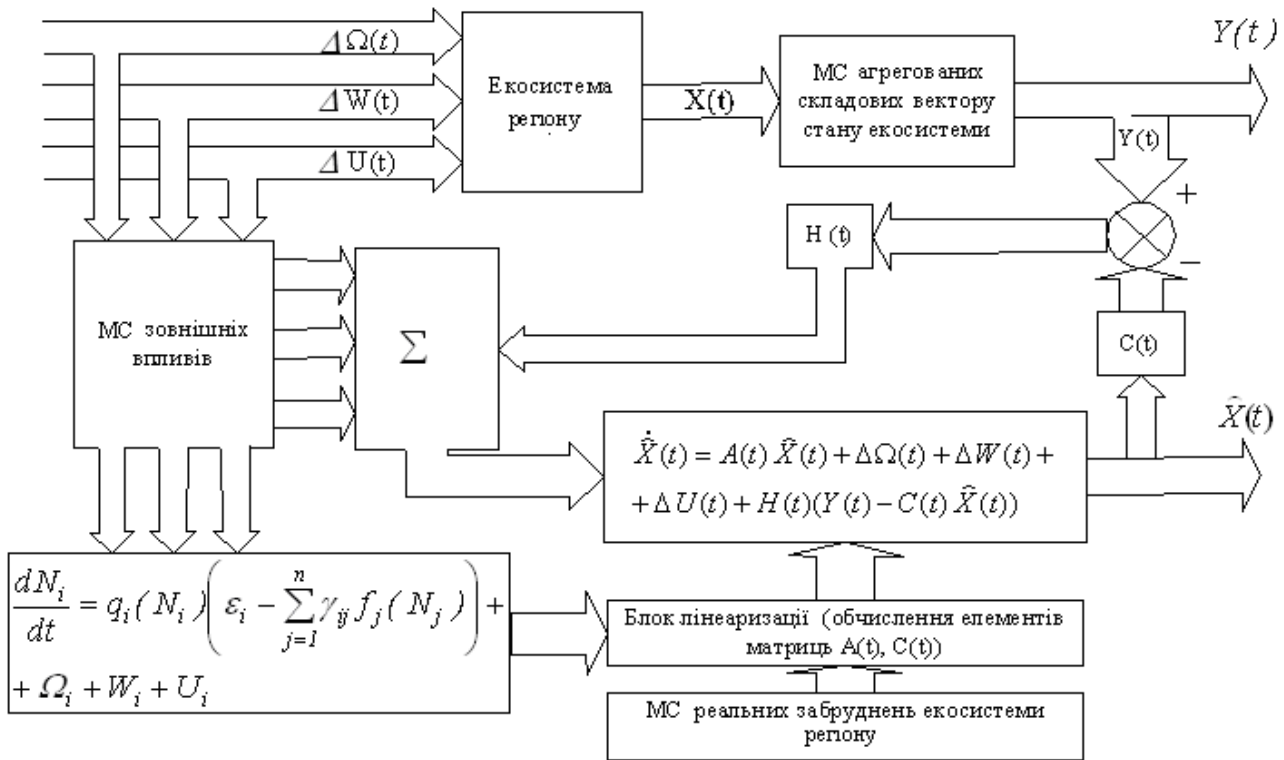


Рис. 3. Модель підключення мобільних сенсорів (МС) мобільної безпроводової сенсорної мережі (МБСМ) до алгоритму спостерігача Льюїсбергера з поточною лінеаризацією в задачі оцінки стану зооценозу екосистеми, ускладненої техногенним навантаженням

рюються) відхилення вектору стану екосистеми від абсолютних значень та реалізується алгоритм ідентифікації параметрів квазістаціонарної математичної моделі екосистем (приблизно сталі значення компонентів матриць  $A$  та  $C$  системи рівнянь (1), (2)). Структурна схема алгоритму спостереження за станом екосистеми доповнюється блоком ідентифікації параметрів матриці  $A$  екосистеми (рис. 4).

Для визначення номінальних вихідних значень (у першому наближенні) можна використовувати ДПІ агрегованих станів екосистеми

та допоміжну інформацію, що отримується за методиками обробки даних біоіндикаторів [15; 16].

Зміст третього – **комбінованого** – способу полягає у тому, що за відомими  $q_i(N_i)$  і  $f_j(N_j)$  аналітичним чином знаходиться структура матриці  $A$ , а потім за вимірами  $N_i$  у вихідному (номінальному) стані та даними ДПІ агрегованих станів визначаються (ідентифікуються) числові значення коефіцієнтів матриці  $A$ . Наприклад, для моделі Вольтерра (10) матриця  $A$  лінеаризованої системи набуває вигляду

$$A = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 - 2\gamma_{11}N_1 - \sum_{j=1}^n \gamma_{1j}N_j, & -\gamma_{12}N_1, & -\gamma_{13}N_1, & \dots & -\gamma_{1n}N_1 \\ -\gamma_{21}N_2, & \varepsilon_2 - \gamma_{21}N_2 - 2\gamma_{22}N_2 - \sum_{j=3}^n \gamma_{2j}N_j, & -\gamma_{23}N_2, & \dots & -\gamma_{2n}N_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\gamma_{n1}N_n, & -\gamma_{n2}N_n, & -\gamma_{n3}N_n, & \dots & \varepsilon_n - \sum_{j=1}^{n-1} \gamma_{nj}N_j - 2\gamma_{nn}N_n \end{bmatrix},$$

де вважається, що  $\varepsilon_i$  та  $\gamma_{ij}$  залежать від індексу забруднень  $I$  відповідно

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i0} + \varepsilon_{i1} \cdot \exp(\varepsilon_{i2} \cdot I); \quad \gamma_{ij} = \gamma_{ij0} + \gamma_{ij1} \cdot \exp(\gamma_{ij2} \cdot I).$$

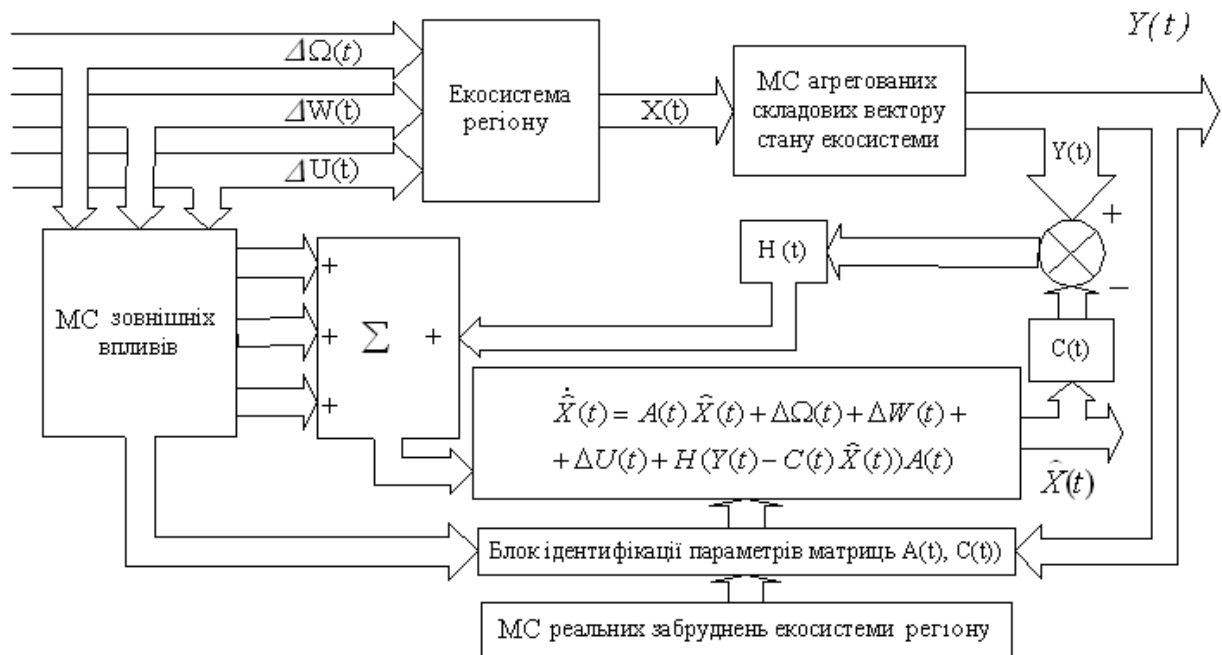


Рис. 4. Модель підключення мобільних сенсорів (МС) мобільної безпроводової сенсорної мережі (МБСМ) до алгоритму спостерігача Льюїнбергера з ідентифікацією параметрів спостерігача в задачі оцінки стану екосистеми, ускладненої техногенним навантаженням

### Висновок

1. Сформульовано підхід, який дозволяє найкращим чином використовувати унікальні інформаційні можливості мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) в інтересах моніторингу стану навколишнього природного середовища: функціонування на не підготовлених ландшафтах, спостереження за зооценозом та мігруючими факторами техногенного впливу.

Розроблено пропозиції щодо розв'язання задачі побудови структурних схем моделей використанням МБСМ для інформаційного забезпечення алгоритмів оцінювання та прогнозування стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням.

2. Запропоновано використовувати МБСМ як джерело первинної інформації про вектор стану екологічної системи регіону, математична модель якої описується звичайними лінійними нестационарними рівняннями, де в якості алгоритмічного спостерігача стану запропоновано використовувати спостерігач Льюїнбергера.

Шляхом доповнення спостерігача Льюїнбергера блоками ідентифікації екологічних процесів, зовнішніх впливів та поширення забруднень отримано структуру імітаційної моделі, яку доцільно використовувати на етапі прогнозного моделювання техногенного впливу та реабілітаційних заходів на навколишнє природне середовище регіону.

3. Запропоновано підхід, який зводить задачу про оцінювання стану екологічної системи, ускладненої техногенним навантаженням, до розв'язання математичної задачі про спостерегаємість системи, тобто запропонований підхід дозволяє застосувати розвинений математичний апарат системних досліджень, який широко використовується у сучасній теорії керування складними системами, в задачах математичної екології.

### Список літератури:

1. Романченко І.С., Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новіков В.І., Тачиніна О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. К. : НАУ, 2016. 332 с.
2. Новіков В.І., Лисенко О.І., Валуйський С.В., Гуйда О.Г. Математичні моделі, методи та алгоритми оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами й телекомунікаційними аероплатформами. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 31 (70) № 3, 2020. Частина 1. С. 54–64.
3. Uryvsky L., Lysenko O., Novikov V., Osypchuk S. Control Methods Research of Indicators for Intelligent Adaptive Flying Information-Telecommunication Platforms in Mobile Wireless Sensor Networks.



In: Klymash M., Beshley M., Luntovskyy A. (eds) Future Intent-Based Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 831. P. 444–467. 2022. Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5_25)

4. V. Romaniuk, O. Lysenko, V. Novikov, I. Sushyn. Development of methods of positioning, localization and data collection from nodes of a free mobile sensor network using intelligent adaptive telecommunication aeroplatforms. Information and Telecommunication Sciences. № 2. 2021. Pp. 40–49. URL: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22021.40-49>

5. Olexander Lysenko, Olena Tachinina, Valeriy Novikov, Iryna Alekseeva, Serhii Chumachenko, Andrii Tureichuk: Expert-modeling decision support system for the deployment and management of a wireless sensor network with mobile sensors and telecommunication air platforms in the emergency zone. SECURITY FORUM 2021 14th Annual International Scientific Conference February 10 th, 2021 at Matej Bel University in Banská Bystrica, Slovakia Conference Proceedings Banská Bystrica, Slovakia 2021. Pp. 249–258. URL: <https://www.fpvmv.umb.sk/drive/2021-11-04/security-forum-2021.pdf>

6. Dan Popescu, Florin Stoican, Grigore Stamatescu, Oana Chenaru, Loretta Ichim. A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring Sensors, 2019, 19(21), 4690; URL: <https://doi.org/10.3390/s19214690>.

7. Zhen Qin, Aijing Li, Chao Dong, Haipeng Dai and Zhengqin Xu. Completion Time Minimization for Multi-UAV Information Collection via Trajectory Planning, Sensors, 2019, 19(18), 4032; URL: <https://doi.org/10.3390/s19184032>.

8. Bin Liu and Hongbo Zhu. Energy-Effective Data Gathering for UAV-Aided. Sensors (Basel). 2019; 19(11): 2506; URL: <https://doi.org/10.3390/s19112506>.

9. Напрямки вдосконалення природоохоронної діяльності в Збройних силах України / за редакцією О.І. Лисенка, С.М. Чумаченка. К. : ННДЦ ОТ і ВБ України, 2006. 424 с.

10. Лисенко О.І., Ісаєв О.М., Шевченко В.Л., Турейчук А.М. Імітаційна модель прогнозування екологічного стану полігона та якості агресивної техногенної діяльності / «Труди академії», № 64, 2005. С. 191–198.

11. Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов И.А. Динамические модели экологических систем. Л. : 1980. 289 с.

12. Агробіорізноманіття України: теорія, методологія, індикатори, приклади / За ред. Созінова О.О., Придатко В.І. Книга 1. К. : ЗАТ «Нічлава», 2005. 384 с.

13. Свирижев Ю.М., Елизаров Е.Я. Математическое моделирование биологических систем. М. : 1972. 159 с.

14. Лысенко А.И., Чумаченко С.Н., Турейчук А.Н. Комплексная оценка и прогнозирование состояния экосистемы техногенно-нагружаемой территории с применением балансовых уравнений и наблюдателя Льюинбергера. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(35). Дніпропетровськ, 2004. С. 139–147.

15. Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Новіков В.І., Гуйда О.Г., Турейчук А.М., Сушин І.О. Методика обґрунтування вимог до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71) № 6. 2021. С. 33–43. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/06>

16. Лисенко О.І., Турейчук А.М., Гуйда О.Г., Новіков В.І., Сушин І.О., Нідченко І.А. Методологія обґрунтування вимог до складу сенсорів безпроводової сенсорної мережі інформаційного забезпечення процедур та алгоритмів системи екологічного моніторингу розподіленого техногенного об'єкту. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 1 2022. С. 133–149. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/06>

17. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М. : Мир, 1977. 650 с.

18. Эйкхоф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 684 с.

19. Гроп Д. Методы идентификации систем. М. : Мир, 1979. 302 с.

20. Современные методы идентификации систем: Перевод с англ. / под редакцией П. Эйкхофа. М. : Мир, 1983. 400 с.

21. Войтенков И.Н. Методы и средства дифференциального оценивания и идентификации моделей. К. : Наук. думка, 1989. 288 с.

22. Изерман Р. Цифровые системы управления. М. : Мир, 1984. 541 с.

23. Справочник по теории автоматического управления / под редакцией А.А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.

24. Богобоящий В.В., Курбанов К.Р., Палій П.Б., Шмандій В.М. Принципи моделювання та прогнозування в екології. К. : Центр навчальної літератури, 2004. 216 с.

**Lysenko O.I., Chumachenko S.M., Yavisya V.S., Guida O.G., Novikov V.I., Sushyn I.O.**  
**MODELS USING MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR ALGORITHMS**  
**EVALUATING AND FORECASTING THE STATE OF ECOLOGICAL SYSTEMS**  
**COMPLICATED BY MAN-MADE LOADS**

*A new approach has been formulated that ensures the presentation of objective and complex quantitative and qualitative information about the level of ecological safety of ecosystems on controlled objects, territories and zones in a form suitable for use in decision support systems. The proposed approach makes it possible to best use the unique information capabilities of mobile wireless sensor networks in the interests of monitoring the ecological state of the natural environment. A mobile wireless sensor network can function on unprepared landscapes and monitor zoocenosis and migratory factors of man-made influence. The mobile wireless sensor network is considered as a source of primary information about the state vector of the ecological system of the region, the mathematical model of which is described by ordinary linear non-stationary equations, where it is proposed to use the Lewinberger observer as an algorithmic state observer. With the help of the Lewinberger observer, it is possible to assess the state of the ecosystem component by component. As a result of supplementing the algorithm of the Lewinberger observer with blocks for identifying ecological processes, external influences and the spread of pollution, the structure of the simulation model was obtained, which is expedient to use at the stage of predictive modeling of man-made impact and rehabilitation measures on the surrounding natural environment of the region. An approach is proposed that reduces the problem of assessing the state of the ecological system, complicated by man-made load, to the solution of the mathematical problem of the observability of the system. Proposals have been developed to solve the problem of building structural diagrams of models using mobile wireless sensor networks for information support of algorithms for evaluating and forecasting the state of ecological systems complicated by man-made loads. The proposed approach makes it possible to apply the developed mathematical apparatus of system research, which is widely used in the modern theory of control of complex systems, in the problems of mathematical ecology.*

**Key words:** wireless sensor network, mobile wireless sensor network, Leuenberger observer, ecological system assessment and forecasting, information technology.

UDC 004.415.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/18>

**Oleshchenko L.M.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”

**Movchan K.O.**

Ukrainian Scientific and Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the Security Service of Ukraine

**Guida O.G.**

V.I. Vernadsky Taurida National University

**Novak D.S.**

Kyiv National University of Technologies and Design

## SOFTWARE METHODS FOR ANALYSIS AND FORECASTING SUSTAINABLE DEVELOPMENT INDICATORS USING PYTHON TOOLS

*Today we have the rapid development of information and communication technology, the amount of global data is exploding. An important task is to identify factors that affect the sustainable development of society through the software analysis of data from various socio-economic indicators. As for today the analysis of sustainable development is a task with a fairly high demand that is done in order to evaluate the influence of various positive and negative factors on the development of the region. With the help of such analysis one can research the economic, social, ecological and technological threats. These metrics can indicate a field having certain positive or negative dynamics. Based on the results achieved, dependencies can be found and improvements for the future can be made. The implementation of software that would automate the creation of necessary tables, performing calculations and building the charts based on the input data is a fairly necessary task.*

*This research is devoted to the analysis of the level of sustainable development of society. Existing methods for analysis and clustering of statistical data about the territorial living standard of inhabitants are researched. Software method of calculating the index of sustainable development of society and the components of quality of life is created. The structure of the database is modeled in the models.py file which is a Django structure file. To test the developed software, statistical data were analyzed using Python tools. The clustering module of proposed software is developed and tested. Clustering algorithms by data set size, number of clusters, by data set type are analyzed and compared.*

**Key words:** software, sustainable development, harmonization of society degree, clustering, statistical data, Python technologies, Django.

### **Introduction. Problem statement**

The full implementation of the concept of sustainable development is inextricably linked with its appropriate provision at various levels of management, the elements of which should provide for full mutual consistency to maximize obtaining a useful result of managing the components of socio-ecological and economic development. Research results show that the dynamics economic growth in recent years has been unstable, since the growth of the Ukrainian economy was determined primarily by the ability to adapt to changes external and internal institutional and economic conditions, rather than the formation of sustainable internal principles of balanced development. At present, the entire world

community is facing an aggravation of not only economic, but also social problems against the backdrop of deteriorating environmental conditions.

As for today the analysis of sustainable development is a task with a fairly high demand that is done in order to evaluate the influence of various positive and negative factors on the development of the region.

With the help of such analysis one can research the economic, social, ecological and technological threats. These metrics can indicate a field having certain positive or negative dynamics. Based on the results achieved, dependencies can be found and improvements for the future can be made. The implementation of software that would automate the

creation of necessary tables, performing calculations and building the charts based on the input data is a fairly necessary task.

**Related research**

The research is based on the sustainable development concept that is derived from Volodymyr Vernadsky's works on the noosphere [1]. Both theory and practice have proven that at the turn of the century the teachings about noosphere turned out to be a necessary basis for developing the concept of continuous ecological, social and economic development [2-4].

**Methodology** of evaluating and analyzing sustainable development covers the model of sustainable development, which is a cross-field generalization of the models known from natural, economic and social science fields, and the ways of utilising formal statistical methods and methods of expert evaluation for analyzing the processes of sustainable development.

**The main goal of the article** is to developed the software method for calculation of the coefficient of sustainable development, analysis of factors of the degree of harmonization of society and speed up time of processing statistical data about the territorial living standard of inhabitants and to obtain more accurate results compared to existing methods.

**Mathematical basis of the proposed method**

We will characterize the process of sustainable development with two main components: safety ( $C_{sl}$ ) and quality of life ( $C_{ql}$ ), and the generalized measurement of sustainable development will be defined by the following quaternion:

$$\{Q\} = jw_{sl}C_{sl} + w_{ql}\overline{C_{ql}}(I_{ec}, I_e, I_s). \quad (1)$$

Quaternion  $\{Q\}$  contains an imaginary balanced scalar faction  $jw_{sl}C_{sl}$  that describes the safety of life and a balanced real vector faction that describes the quality of life in a space with three dimensions: economic ( $I_e$ ), ecological ( $I_{ec}$ ) and the dimensional of social institutes ( $I_s$ ). In addition,  $j$  gains the value of a real unit for a regular state of the development of society while  $C_{sl} > 0$  and the value of an imaginary unit when the society enters a state of conflict ( $C_{sl} = 0$ ).

Balance coefficients  $w_{sl}$  and  $w_{ql}$  in the formula (1) are used in order to equalize the scales of safety and quality of life components (in case of evaluating sustainable development of Ukraine's regions  $w_{sl} = w_{ql} = 1$ ).

Index of Sustainable Development is a quantity measurement of sustainable development, that includes safety and quality of life and for the case of  $C_{sl} > 0$  is calculated as the norm of quaternion  $\{Q\}$ :

$$\{Q\} = \sqrt{w_{sl}^2 C_{sl}^2 + w_{ql}^2 (I_{ec}^2 + I_e^2 + I_s^2)}. \quad (2)$$

For every region the euclidean norm of quality of life radius-vector  $\overline{C_{ql}}$  will be given in the following form:

$$\overline{C_{ql}} = \sqrt{I_{ec}^2 + I_e^2 + I_s^2}. \quad (3)$$

Than the quantity measurement of quality of life will be defined as the length of a projection of this vector onto an vector with the coordinates of (1; 1; 1):

$$C_{ql} = \sqrt{I_{ec}^2 + I_e^2 + I_s^2} \cdot \cos(\alpha). \quad (4)$$

Deviation angle  $\alpha$  of radius-vector  $\overline{C_{ql}}$  from the vector (1, 1, 1) is defined by the values of the measurements  $I_{ec}, I_e, I_s$  in the following way:

$$\alpha = \arccos \frac{I_{ec} + I_e + I_s}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{I_{ec}^2 + I_e^2 + I_s^2}}, \quad (5)$$

$$0 \leq \alpha \leq \arccos \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Accordingly, the length of a projection of the radius-vector  $\overline{C_{ql}}$  onto an ideal vector (1, 1, 1) describes the quality of life, while the orientation of the vector  $\overline{C_{ql}}$  inside the coordinate space ( $I_{ec}, I_e, I_s$ ) describes the measure of the "harmony" of sustainable development.

Vector  $\overline{C_{ql}}$ 's equal distancing from every one of coordinates will correspond to the most harmonic development while closing in to one of the coordinates will indicate a priority in development in the corresponding dimension and negligence toward the other two. The value  $G = 1 - \alpha$  will be named the level of harmony of sustainable development. It will grow when  $G$  is closing to 1 and drop with  $G$  closing to 0. Accordingly the Quality of life component is an integrated value that simultaneously includes all three dimensions of sustainable development and the interconnection between three inseparable fields of society's development: economic, ecological and social. Level of harmony of sustainable development is the balance between its economic, ecological and social dimensions.

The values of sustainable development dimensions that were used to define the Quality of life component should be based on the data from a wide spectrum of phenomena of various nature. Additionally these values must be integral, meaning they must describe a certain aspect of human life as a coherent system. In order to evaluate the quantity measurements of the sustainable development dimensions we will use the

principles of building a hierarchical system of values and indexes defined as  $L_1$ -norms:

$$I_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{i,j}, \quad i = \overline{1, m}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (6)$$

in the space of values  $X^1 \times X^2 \times \dots \times X^m$ , that describe economic, ecological and social development of every  $i$ -th region. Balance coefficients  $w_i$  in the formula (6) are defined by expert evaluation.

Using formula (6) requires the harmonization of various data, including both measurement units and value ranges [5]. That's why if greater values of a measurement  $X^i$  correspond to a better state of sustainable development, then we use a logistical norm for measurement values according to formula:

$$C_{norm}(x_{i,j}) = \left( 1 + e^{\frac{a-x_{i,j}}{b}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

where the parameters  $a$  and  $b$  are calculated as an average value and standard divergence of the sample of regions being analyzed.

In the opposite case if greater values of  $X^i$  correspond to worse state of the sustainable development, then a value inverse to one calculated through formula (7) is used:

$$C_{norm}(x_{i,j}) = 1 - \left( 1 + e^{\frac{a-x_{i,j}}{b}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

The total influence of threats on different regions of Ukraine will be evaluated using a Safety of life component  $C_{sl}$  as a part of the Index of sustainable development used in the formula (1).

To every region  $j$  a corresponding vector:

$$Tr_j = (t_i^j), \quad j = \overline{1, n} \quad (9)$$

will be assigned with its coordinates  $t_i^j \in [0, 1], i = \overline{1, n}$  describing the level at which every threat manifests.

The value of measurements describing the occurrence of said threats are harmonized using the formulas (7)–(8) in a way where the greater threat levels have their correspondent values close to 1 [1–5].

To organize the decision-making process aimed at sustainable economic, socio-natural development of the region, it is necessary to develop a methodology for calculating the integral indicator of sustainable development of the regional economy, where the main indicators would be closely linked to the targets and priority areas for the development of the strategic plan of the region.

When calculating indicators of sustainable development, there are two methodological approaches that differ in structure and applied principles of construction. In the first approach, all calculated indicators of the system reflect certain aspects of sustainable development, that is, they distinguish the following subsystems of indicators: economic, social, environmental and institutional. In this case, they usually consider various options for issues, problems, tasks that are submitted for consideration, which may not even have a quantitative characteristics, but only a descriptive answer. In the second approach, an integral indicator is constructed that indicates the degree of sustainability of economic and social and environmental development. With the growth of such an aggregated indicator, the economy of the region takes the path that brings it closer to sustainable development, and with its decrease or with a negative value, the movement occurs in the opposite direction to the destructive type of development.

#### Statistical data for research

For completing analyzing the sustainable development of Ukraine's regions the task was complemented with a .osd file that contains the data on all Ukraine's regions in two years (2017 and 2018). This file contains such indicators as: Level of housing needs satisfaction, The number of infected with HIV, Integrated atmospheric pollution index averaged on the population of observed towns etc. All this data had to be read from the file and develop a procedure that would calculate the model of sustainable development (composite indicator that is calculated based on measurements) and harmony level using the programming tools of Python.

Using programming tools of Python we represent the sustainable development index and harmony level (visualize the data) by the regions and find the correlation chart between all the indicators (by the use of corresponding interface buttons). Additionally a sample of statistically influential indicators ( $r > 0.7$  and  $r < -0.7$ ) had to be made and a conclusion about their corresponding levels of connection had to be formulated. Next we had to perform a regression analysis of statistically important indicators (independent variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$ ) influence on the sustainable development index (dependent variable  $Y$ ) and separately on the harmony level (also as a dependent variable). Develop according regression mathematical models for all 27 regions of Ukraine. Also a database for storing input data and generated results of input files analysis had to be created. We need to create a database to store the input files and the generated analysis results of the input files. Import the results of calculating the sustainable development

index ( $I_{sd}$ ) and harmony level ( $G$ ) in .csv and xls formats for all 27 regions of Ukraine.

**The proposed software method and software modules description**

Python is one of the most widely used programming languages thanks to it being easy to learn, well-designed and flexible, making it practically a perfect programming language. Django is an immensely popular and fully functional server-side web framework written in Python. This framework can work with any client-side platform and can deliver content in almost any format (including HTML, RSS-channels, JSON, XML). Django includes dozens of additional functions that fulfil user authentication, site mapping, content administration, RSS etc. Django uses a component-based architecture (every component of the architecture is independent from the others and thus can be replaced or altered in case of such necessity). Django framework is extremely well suited for high traffic workloads. Django uses the Do not Repeat Yourself (DRY) principle, thus avoiding unnecessary code repeats, reducing the overall quantity of code [6–7].

For the data output in comfortable format, the output of tables and charts the following instruments had to be used. Highcharts is a library for chart creation that is written in Javascript. It allows adding interactive and animated charts to the website or the web application easily. At the moment charts include a large variety of line graphs, pie charts, column charts and many other types of graphs. Also a standard Python set of tools for mathematical operations and data analysis

was utilised. The proposed software contains the following modules:

1. Module for reading and processing the information from the file, which contains the data on 27 territorial units of Ukraine.

2. Module performing the procedure of calculating the sustainable development index model (composite indicator that is calculated based on measurements) and harmony level.

3. Software modules for the graphical representation of sustainable development index and harmony level (data visualization) by the regions and finding the correlation chart between all indicators (by the use of corresponding interface buttons).

4. A module performing regression analysis of statistically important indicators influence on the sustainable development index and separately on the harmony level and building according regression mathematical models for all 27 regions of Ukraine.

5. A module for storing input data and generated results of input files analysis.

6. A module for importing the results of calculating the sustainable development index ( $I_{sd}$ ) and harmony level ( $G$ ) in .csv and .xls formats for 27 regions of Ukraine into the database.

For the better understanding of the software structure a visual representation of all the modules and components of the project is provided. Here is a dependency scheme of the proposed software frontend (chart visualization part) (fig. 1).

One of the main parts in implementing software is the database. The structure of the database is modeled

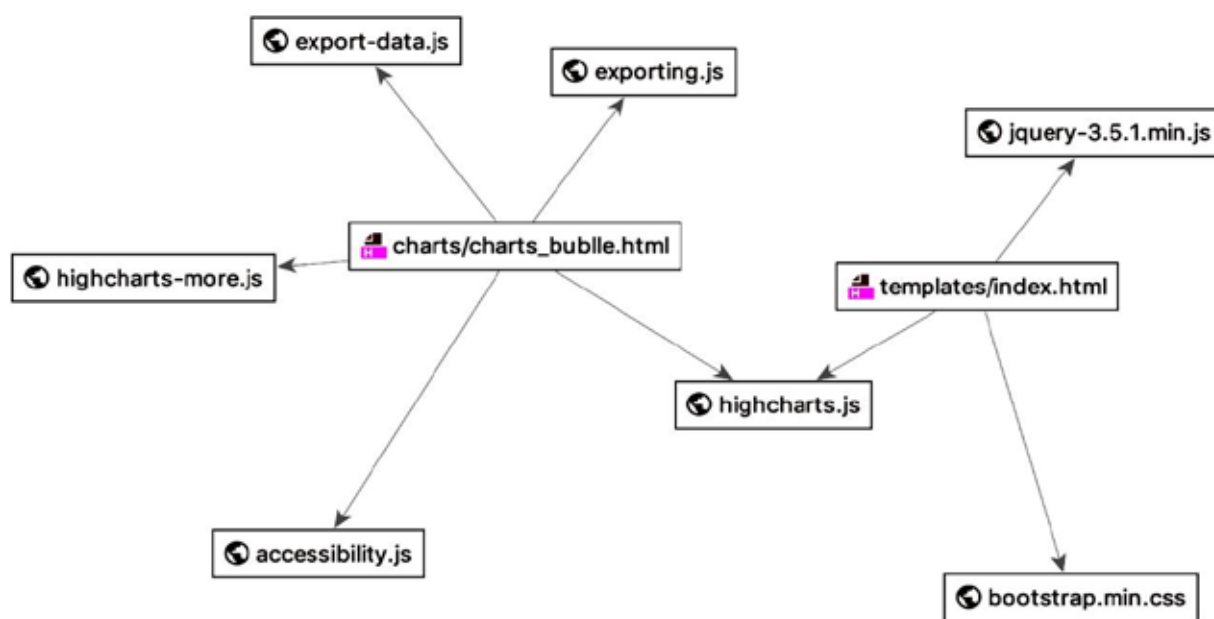


Fig. 1. Visualization module

in the models file (models.py) which is a Django structure file. After modelling the database tables that are correspondent to the models are created automatically via migration.

*Data reading and processing module.* In order to use the application one has to download the .osd data file containing the information on 27 territorial units of Ukraine. This functional possibility is taken response of by the method export\_data in the file views.py. Here we receive the data and perform the calculations of all the key indicators. After the data has been processed the calculation of the indicators has to be performed. After the indicators have been calculated we have to provide the possibility of saving this data into the database.

Thus we have the functionality for the page “Upload a file”, which can be used to upload and save the data and also show the resulting values (fig. 2).

*Data visualization module.* For outputting the vulnerability correlation chart for the harmony level and sustained development index we have to consult

the file charts.py and the method chart\_garmonizacii where the process of calculating the correlation coefficient occurs. This coefficient is later loaded into the corresponding chart (fig. 3) where the user can review the received data.

*Data analysis module.* For implementing the regressive model we determine the correlation coefficient for every region and every type of threats [8]. For this task we use the method charts\_buble from charts.py. For a start we use a loop to look through all the regions and get the necessary indicators from every one of them, and then use the data from these coefficients to calculate the correlation coefficient.

According to the analysis of the Sustainable Development Index for Ukraine, we will perform clustering of regions of Ukraine on this indicator into five clusters (Highest level of sustainable development, High level of sustainable development, Average level of sustainable development, Level of sustainable development below average, Low level of sustainable development) (fig. 4).

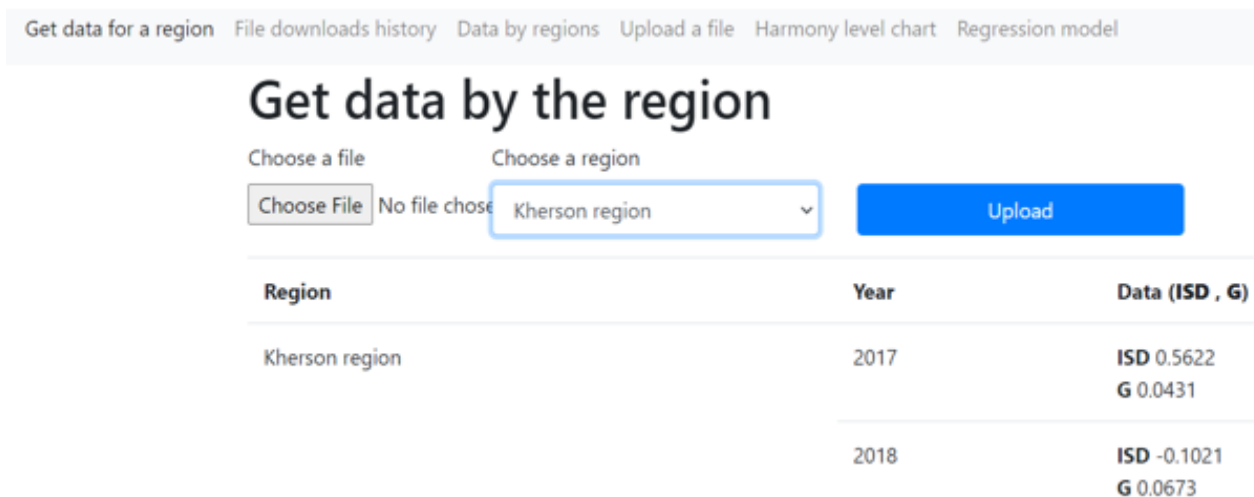


Fig. 2. View of the resulting data

	Vulnerability to threats						Technological threat
	Social type		Economic type	Ecological type			
	Corruption	Healthcare index	Economic well-being	Climate change	Air pollution	Load on water resources	
Sustained development index	-0.0165	-0.2192	-0.2236	0.1119	-0.0187	-0.2011	0.2444
Harmony level	-0.0153	-0.2029	-0.207	-0.1036	-0.0174	-0.1861	-0.3784

Fig. 3. Vulnerability to threats

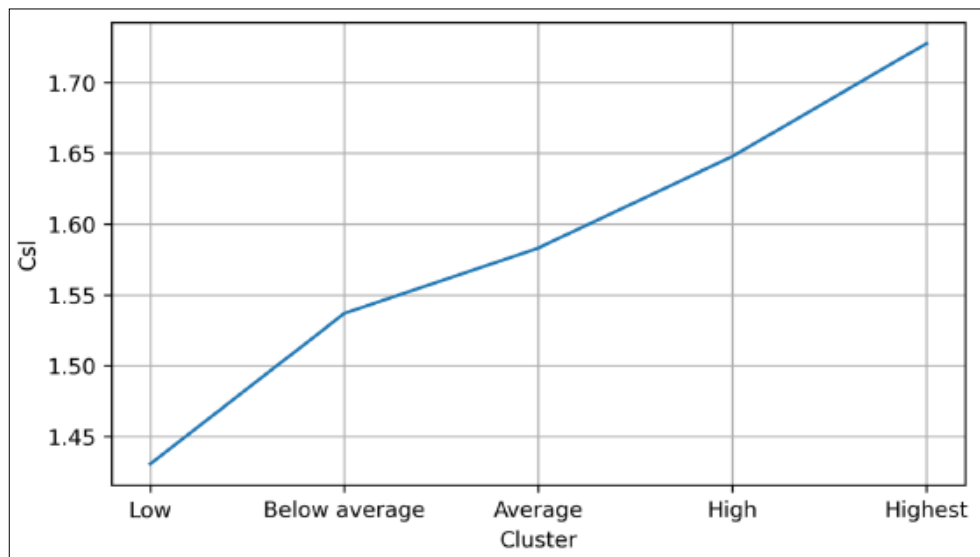


Fig. 4. Mean values of the life safety components for clusters, 2018

```
kmeans = KMeans(n_clusters=5, init='k-means++')
clusters_csl_2018 = pd.Series(kmeans.fit_predict(data_2018.loc[:, ['Csl']]), index=data_2018.index, name='cluster_num')
pd.concat([data_2018['region_name'], clusters_2018, clusters_csl_2018.rename('cluster_csl')], axis=1)
```

We analyze the main parameters that affect the sustainable development of regions to build a scattering diagram of the dependence of the Sustainable Development Index on the degree of harmonization. We see that in both years in clusters with a higher index of sustainable development, the average index of life safety is also higher. But if we compare clusters by sustainability index and security component, they are different. Kyiv city, for example, no longer has its own cluster – the clusters are more uniform. Both trends are repeated in 2017 and 2018.

In Kyiv city, the economic component significantly outperforms other components of quality of life. If we talk about the main components of the index of sustainable development, the quality of life index has a greater impact on it, but the positive correlation between the two main components is significant.

For example, in 2018, both components have less impact (fig. 5). In the correlation tables of the Sustainable Development Index and the Vulnerability Index we can see that in 2017 the largest inverse correlation has the provision of the population with doctors, and in 2018 – the average life expectancy.

To get the regression model we navigate to the /charts-bubble/ page where we review the correlation chart of the regions' vulnerability to

threats and the regression models for every threat category are presented (fig. 6). To use the required chart for every threat type, we have to use the side buttons.

#### Research results

Functioning of clustering algorithms depends on the mathematical & logical procedure which they use to solve a problem, and also on the input dataset [9–10]. Hierarchical clustering algorithms are not suitable for large dataset due to time complexity. *K*-means can form clusters very effectively and faster than most algorithms. For our research the four clustering algorithms (*k*-means, Hierarchical Clustering (HC), Self-Organization Map (SOM) algorithm, Expectation Maximization (EM) clustering algorithm) are compared according to the following factors: the size of datasets, number of clusters, dataset type. The performance of different algorithms for different *k* is compared in order to test the performances that are related to *k*. To compare Hierarchical Clustering with other algorithms, the hierarchical tree is cut at two different levels to obtain corresponding numbers of clusters. *K*-means and EM algorithms have less quality (accuracy) than others. All the algorithms have some ambiguity in some noisy data to be clustered. The small dataset is extracted as a subset of the huge data set. The quality of EM and *k*-means algorithms becomes very good when using a huge data set. The other two algorithms Hierarchical Clustering and SOM show good results when using a small data set.

Partitioning algorithms (EM and *k*-means) are used for huge dataset while hierarchical clustering algorithms are used for small data set. For *k* from 3



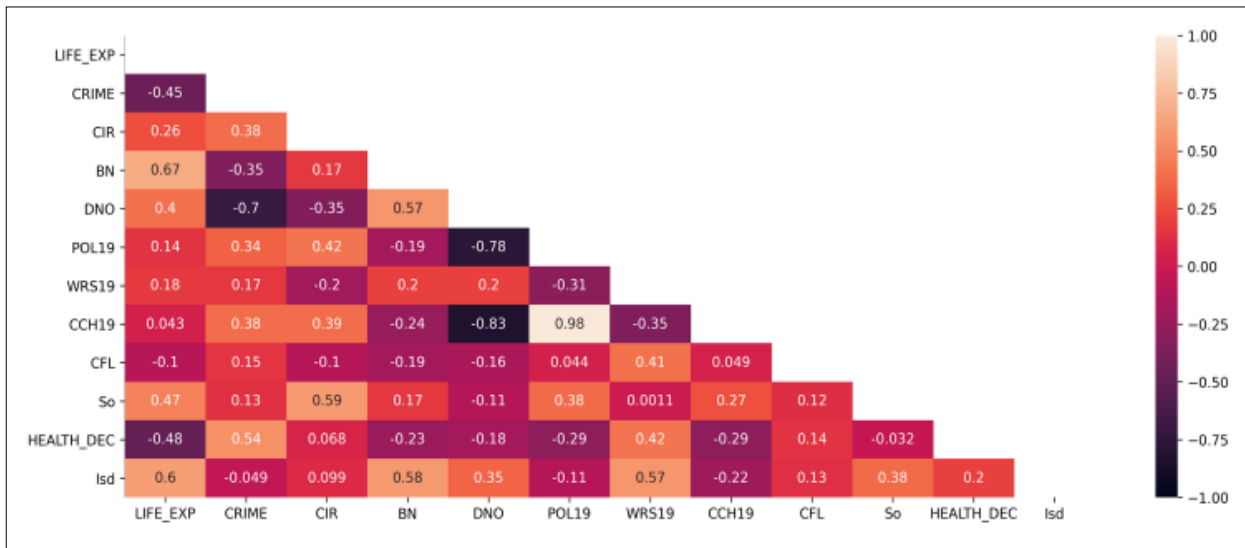


Fig. 5. Correlation coefficients between sustainable development indicators and vulnerability to the impact of threats, 2018

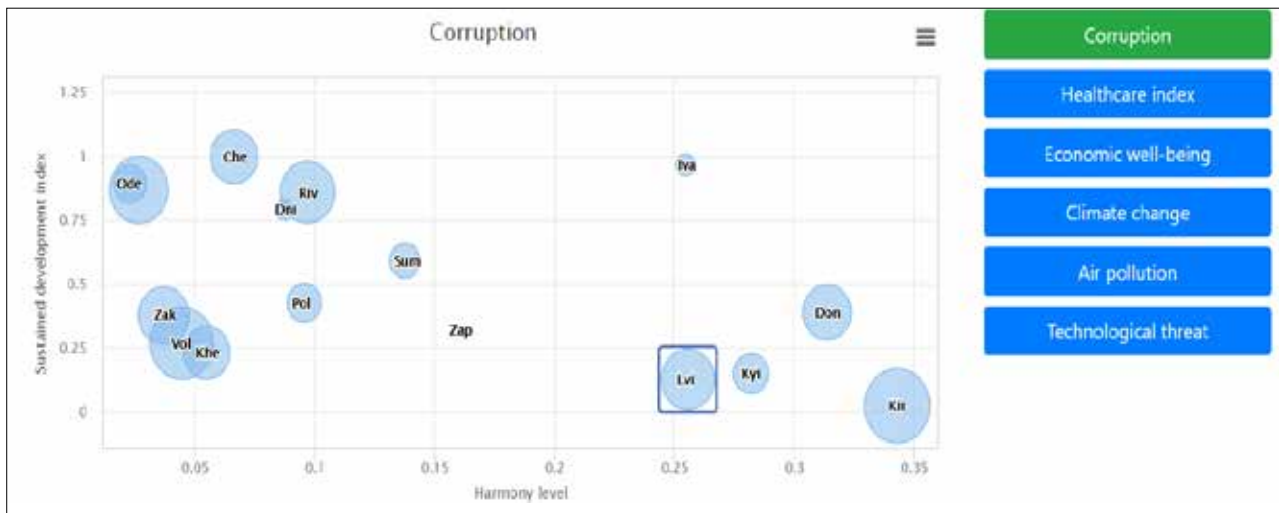


Fig. 6. Regression model for corruption indicator

to 8 on average we get 3–8% better result. After analyzing the results of testing the clustering algorithms and running them under different factors and situations, the following conclusions obtained: as the number of clusters  $k$  becomes greater, the performance of SOM algorithm becomes lower. The performance of  $k$ -means and EM algorithms is better than hierarchical clustering algorithms. The quality of  $k$ -means and EM algorithms become a very good when using huge data set.

In our research we used the  $k$ -means++ algorithm to choose the initial values, or the initial cluster centroids, for  $k$ -means, because in some cases, if the initialization of clusters is not appropriate,  $k$ -means can result in arbitrarily bad clusters.  $K$ -means++ specifies a procedure to initialize the cluster centers

before moving forward with the standard  $k$ -means clustering algorithm.

Using the  $k$ -means++ algorithm, we optimize the step where we randomly pick the cluster centroid. We are more likely to find a solution that is competitive to the optimal  $k$ -means solution while using the  $k$ -means++ initialization.

### Conclusions and future work

Existing methods for analysis and clustering of statistical data about the territorial living standard of inhabitants are researched. Software method of calculating the index of sustainable development of society and the components of quality of life is created. To test the developed software, statistical data were analyzed using Python tools. The clustering module of proposed software is developed and tested.

The four clustering algorithms ( $k$ -means, Hierarchical Clustering, Self-Organization Map algorithm, Expectation Maximization clustering algorithm) are compared according to the following factors: the size of datasets, number of clusters, dataset type. For number of clusters  $k$  from 3 to 8 on average we get 3–8% better result using  $k$ -means algorithm.

Through proposed software method, problems can be clearly identified and solved as soon as possible, so as to provide a better living environment and living standard for the people. Developed software for analyzing the sustained ment of Ukraine's regions allows to analyze the data and receive conclusive results.

#### References:

1. Вернадский В. И. Несколько слов о ноосфере. *Успехи современной биологии*. 1944. No 18, вып. 2. С. 113–120.
2. Zgurovsky M. Z. Sustainable development global simulation: Opportunities and threats to the planet. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2007. Vol. 9, ES2003, doi: 10.2205/2007ES000273.
3. Аналіз сталого розвитку – глобальний і регіональний контексти: у 2 ч. Ч. 2. Україна в індикаторах сталого розвитку. Аналіз – 2009. Виконавці: А.О. Болдак, С.В. Войтко, І.М. Джигирей та інші : наук. кер. М.З. Згуровський. К. : НТУУ «КПІ», 2009. 200 с.
4. Аналіз сталого розвитку – глобальний і регіональний контексти: у 2 ч. Ч. 1. Глобальний аналіз якості та безпеки життя людей. Аналіз – 2009. Виконавці: А.О. Болдак, С.В. Войтко, І.М. Джигирей та інші: наук. кер. М. З. Згуровський. К. : НТУУ «КПІ», 2009. 280 с.
5. Згуровский М.З., Болдак А.А., Ефремов К.В. Интеллектуальный анализ и системное согласование научных данных в междисциплинарных исследованиях. *Кибернетика и системный анализ*. 2013. No 4. С. 62–75.
6. Django documentation. URL: <https://docs.djangoproject.com/en/2.2/>
7. Advantages and Disadvantages of Python Programming Language. URL: <https://medium.com/@mindfiresolutions.usa/advantages-and-disadvantages-of-python-programming-language-fd0b394f2121>
8. Linear Regression in Python. URL: <https://realpython.com/linear-regression-in-python/>
9. Sushant Bhargav, Mahesh Pawar. A Review of Clustering Methods forming Non-Convex clusters with, Missing and Noisy Data. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. Mar 2016, Vol. 4 (3), P. 39–44.
10. Jain A., Dubes R. Algorithms for Clustering Data. Prentice Hall, IGI Global, 2012, pp. 43-62.

#### Олещенко Л.М., Мовчан К.О., Гуйда О.Г., Новак Д.С. ПРОГРАМНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТІВ PYTHON

Сьогодні спостерігається стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та збільшення обсягів великих даних. Важливим завданням є виявлення факторів, що впливають на сталий розвиток суспільства шляхом програмного аналізу даних різних соціально-економічних показників. На сьогоднішній день аналіз сталого розвитку є досить затребуваним завданням, яке виконується з метою оцінки впливу різних позитивних і негативних факторів на розвиток регіону. За допомогою такого аналізу можна досліджувати економічні, соціальні, екологічні та технологічні загрози. Ці показники можуть вказувати на поле з певною позитивною чи негативною динамікою. На основі досягнутих результатів можна знайти залежності та пропонувати покращення показників на майбутнє. Актуальним завданням є впровадження програмного забезпечення, яке дозволило б автоматизувати створення необхідних таблиць, виконання розрахунків та побудову діаграм на основі вхідних даних.

Дане дослідження присвячене аналізу рівня сталого розвитку суспільства. Досліджено існуючі методи аналізу та кластеризації статистичних даних. Створено програмний метод розрахунку індексу сталого розвитку суспільства та складових якості життя. Структура бази даних моделюється у файлі *models.py*, який є файлом структури Django. Для тестування розробленого програмного забезпечення були проаналізовані статистичні дані за допомогою інструментів Python. Розроблено та апробовано модуль кластеризації запропонованого програмного забезпечення. Проаналізовано та порівняно алгоритми кластеризації за розміром наборів даних, кількістю кластерів, за типом набору даних.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, сталий розвиток, ступінь гармонізації суспільства, кластеризація, статистичні дані, технології Python, Django.

**Сазонов А.Ю.**

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

**Чередниченко В.І.**

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

**Черепанська І.Ю.**

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

## МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ ТА СТАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОБІЛЬНОГО КРОКУЮЧОГО ЕВАКУАЦІЙНОГО РОБОТА

У статті проаналізовано можливості і сфери використання крокуючих роботів, запропоновано прототип конструкції мобільного крокуючого евакуаційного робота для виконання складних завдань транспортування постраждалих людей в умовах надзвичайних ситуацій. Також, проведено аналіз запропонованої конструкції, надано розв'язання прямої задачі кінематики для вищезазначеного типу роботів і представлені результати моделювання для підтвердження працездатності запропонованого прототипу конструкції. У наступному пункті авторами буде проведено аналіз зазначеної проблеми, а саме евакуація постраждалих людей у результаті надзвичайних ситуацій, техногенних катастроф та інших випадків, що характеризуються складним ландшафтом, який підтверджує актуальність проведення досліджень у даній області. Далі у статті, авторами буде проведено аналіз існуючих варіанти мобільних крокуючих роботів та визначено їх переваги і недоліки. Опісля, для запропонованої конструкції мобільного крокуючого робота наведено розв'язок прямої задачі кінематики, в уніфікованому вигляді. Наступним, буде наведено розроблений авторами теоретичний прототип конструкції (тримірна модель) мобільного крокуючого робота, який повинен виконувати евакуаційні завдання у місцевості, яка має складний, нерівномірний рельєф. Окрім кінематики, у статті авторами проведено статичне дослідження прототипу розробленої моделі мобільного крокуючого робота, що ставило на меті утримати масу рівну 150 кг та більше. Такий вибір обумовлений тим, що середня вага середньостатистичної дорослої людини складає близько 90 кг. Окрім номінального навантаження, необхідна наявність так званого запасу міцності та стійкості, значення якого має складати дві треті від номінального навантаження. Для перевірки витривалості конструкції та проведення симуляційних досліджень було використано модуль Simulation у програмному забезпеченні Solidworks, який забезпечує детальне та якісне моделювання і тестування тривимірних об'єктів різних ступенів складності, надаючи можливість дослідження широкого спектру параметрів.

**Ключові слова:** твердотільне моделювання, пряма задача кінематики, крокуючий робот, градієнт навантажень, зміщення, евакуаційний.

**Постановка проблеми.** З кожним роком через зміни кліматичних умов, війни та експансію людства. Як наслідок ми все частіше зустрічаємось з надзвичайними ситуаціями, де головною перешкодою для порятунку людей стає рельєф [1–3]. Через це стандартні евакуаційні засоби, наприклад колісні носилки, неможливо, або дуже складно доставити до місця порятунку і, як наслідок, все більше і більше зростає потреба у механізмах, які здатні спростити або полегшити евакуаційні заходи при переміщенні вантажів або поранених по складному, нерівномірному рельєфу. Як один з можливих

варіантів реалізації такої проблеми, запропоновано використання мобільних крокуючих роботів, що на відміну від колісних мають можливість переміщуватись по пересічній місцевості за допомогою ніг.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Відомими прикладами крокуючих роботів є: Go 1 pro (рис. 1а) [4], Jueying (рис. 1б) [5], SPOT Mini [6] (рис. 1в), SDU SCalf-II (рис. 1г) [7]. За посиланнями, наведеними у літературі, можна переглянути більш детальні характеристики названих роботів. Слід відмітити, що вони непридатні для транспортування вантажу великої маси,

а висока швидкість їх переміщень призводить до втрати стійкості верхньої платформи, що є критичним для переміщення поранених при евакуації. Також, слід відзначити, всі вони мають досить високу вартість, що обмежує їх масове використання. Тому у статті запропонована і розглянута конструкція крокуючого чотириногого робота, метою розроблення якої є забезпечення достатньої вантажопід'ємності для умов евакуації та стабільності платформи. Також наведено розв'язання прямої задачі кінематики для даної конструкції.

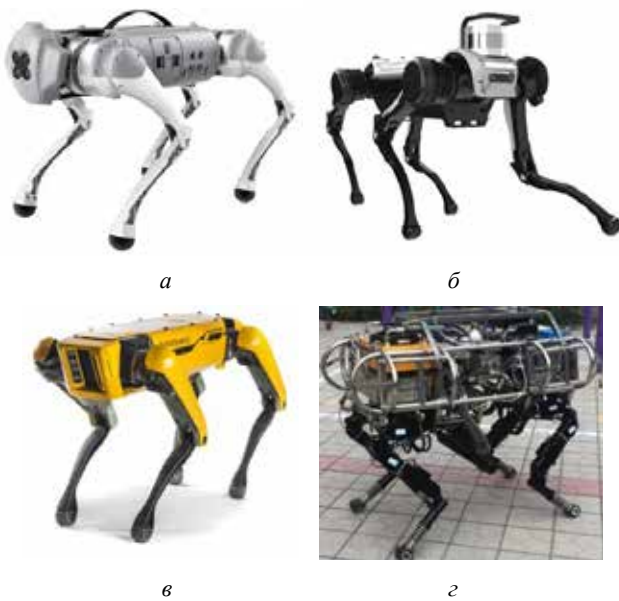


Рис. 1. Площини прикладання навантажень та місце фіксації моделі:

а – Go 1 Pro, б – Jueying, в – SPOT Mini, г – SDU SCalf-II [4-7; 8 с. 5, 6]

**Постановка завдання.** Дослідити пряму задачу кінематики для чотириногого крокуючого робота. Розробити конструкцію чотириногого крокуючого евакуаційного робота, який був би здатен витримати навантаження на верхню площину корпусу у 150 кг [9].

**Пряма задача кінематики.** Пряма задача кінематики необхідна для обчислення координат кінцевого положення останньої ланки робота. У нашому випадку, вона буде вирішуватись для ноги крокуючого робота. Як точку відліку виберемо центр мас нашої конструкції, її початкові координати  $O(x_m, y_m, z_m)$ . Шуканими будуть координати положення стопи робота, які відповідають точці  $E(x_3, y_3, z_3)$ . Створимо кінематичну модель ноги нашого робота (рис. 2) [10, с. 9].

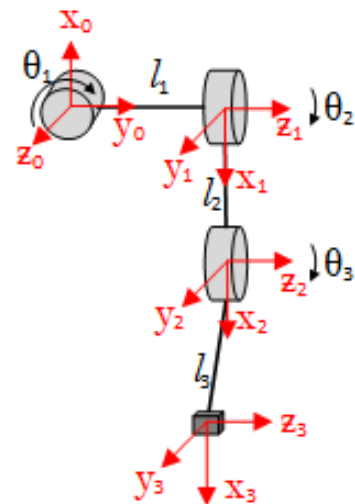


Рис. 2. Кінематична модель ноги

Запишемо матриці обертання для створеної схеми (рис. 2):  
для з'єднання 0-1:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

для з'єднання 1-2:

$$R_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

для з'єднання 2-3:

$$R_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для наступних дій нам потрібні вектори зміщень, складемо їх:  
для з'єднання 0–1:

$$d_1^0 = \begin{bmatrix} -s\theta_1 \cdot l_1 \\ -c\theta_1 \cdot l_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

для з'єднання 1–2:

$$d_2^1 = \begin{bmatrix} c\theta_2 \cdot l_2 \\ s\theta_2 \cdot l_2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

для з'єднання 2–3:

$$d_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 \cdot l_3 \\ s\theta_3 \cdot l_3 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Отримавши матриці поворотів (1), (2), (3) і вектори зміщень (4), (5), (6), об'єднаємо їх у матриці гомогенних перетворень, скориставшись формулою (7).

$$H_m^n = \begin{bmatrix} R_{n+1}^n & d_{n+1}^n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $n$  – порядковий номер координатної системи виконавчого механізму.

Результуючу матрицю гомогенних перетворень знайдемо за формулою (8).

$$H_3^0 = H_1^0 \times H_2^1 \times H_3^2. \quad (8)$$

Остаточний результат наведено у (9).

$$H_3^0 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де  $h_{nm}$  – елементи матриці  $H_3^0$  ( $n$  – номер рядку,  $m$  – номер стовпця), що вказані у таблиці 1.

Таблиця 1

Елемент матриці	Формула
1	2
$h_{11}$	$-\cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_3)$
$h_{12}$	$\cos\theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$
$h_{13}$	$-\sin\theta_1$
$h_{14}$	$-\cos\theta_1 \cdot (\cos(\theta_2 - \theta_3) \cdot l_3 + \cos\theta_2 \cdot l_2) - \sin\theta_1 \cdot l_1$

Закінчення таблиці 1

$h_{21}$	$-\sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_3)$
$h_{22}$	$\sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$
$h_{23}$	$\cos\theta_1$
$h_{24}$	$-\sin\theta_1 \cdot (\cos(\theta_2 - \theta_3) \cdot l_3 + \cos\theta_2 \cdot l_2) - \cos\theta_1 \cdot l_1$
$h_{31}$	$\sin(\theta_2 + \theta_3)$
$h_{32}$	$\cos(\theta_2 - \theta_3)$
$h_{33}$	0
$h_{11}$	$\sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot l_3 + \sin\theta_2 \cdot l_2$
$h_{41}$	0
$h_{42}$	0
$h_{43}$	0
$h_{44}$	1

Крім матриць гомогенних перетворень, на основі (рис. 2) складемо таблицю параметрів Денавіта-Хатенберга (таблиця 2).

Таблиця 2

	$\theta$	$\alpha$	$r$	$d$
1	$\theta_1 - 180^\circ$	$90^\circ$	$l_1$	0
2	$\theta_2$	0	$l_2$	0
3	$\theta_3$	0	$l_3$	0

### Опис запропонованої конструкції.

Для рішення поставленої задачі, а саме транспортування вантажів великої маси (враховуючи відносність поняття «велика» зауважимо, в нашому випадку під цим поняттям розглядаються маса  $m$  від 150 кг до 200 кг включно) по складному рельєфу нами було розроблено прототип конструкції крокохода (рис. 3).

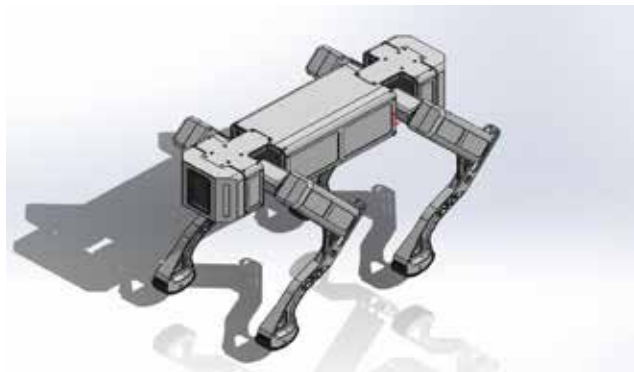


Рис. 3. Модель прототипу конструкції, ізометрія

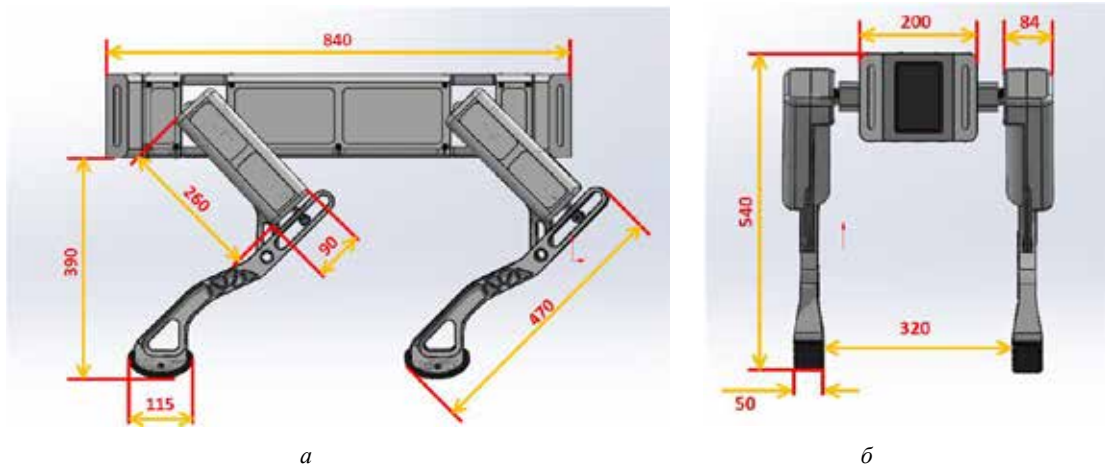


Рис. 4. Модель прототипу конструкції: а – вид збоку, б – вид спереду

Основні параметри конструкції наведено на (рис. 4 а, б). У якості основного матеріалу, з якого виготовлено деталі робота, використовується ABS пластик, що має високу міцність. Основи нижніх кінцівок робота виготовлені з гуми, для забезпечення стійкості і зменшення ймовірності проковзування на слизьких поверхнях.

Корпус можна умовно поділити на три частини: передню, центральну і задню. Центральна частина містить електронні компоненти системи керування роботом. Завдяки симетричності корпусу та наявності декількох кріплень передня та задня частини уніфіковані, що є однією із основних вимог гнучкого автоматизованого виробництва при їх масовому виготовленні. Передня частина використовується для монтажу сенсорних систем, що використовуються для навігації у просторі на основі візуальних даних, а задня для закріплення кнопки вмикання/вимикання живлення, портів введення/виведення даних та живлення. Запропонована форма ноги (рис. 5) дозволяє підвищити вантажопід'ємність робота, розподіляючи навантаження між ребрами жорсткості. Ближче до стопи, ширина ноги збільшується, що збільшує загальну стійкість конструкції як у статичному положенні, так і в динамічному.



Рис. 5. Модель прототипу ноги робота, вид збоку

Верхні кришки корпусу змінні, що забезпечує модульність конструкції, яка також є однією

із вимог сучасного гнучкого автоматизованого виробництва і дозволяє встановити додаткове обладнання (наприклад, додаткові камери, вантажні платформи тощо). Дана можливість, в свою чергу, підвищує універсальність та варіативність застосування робота.

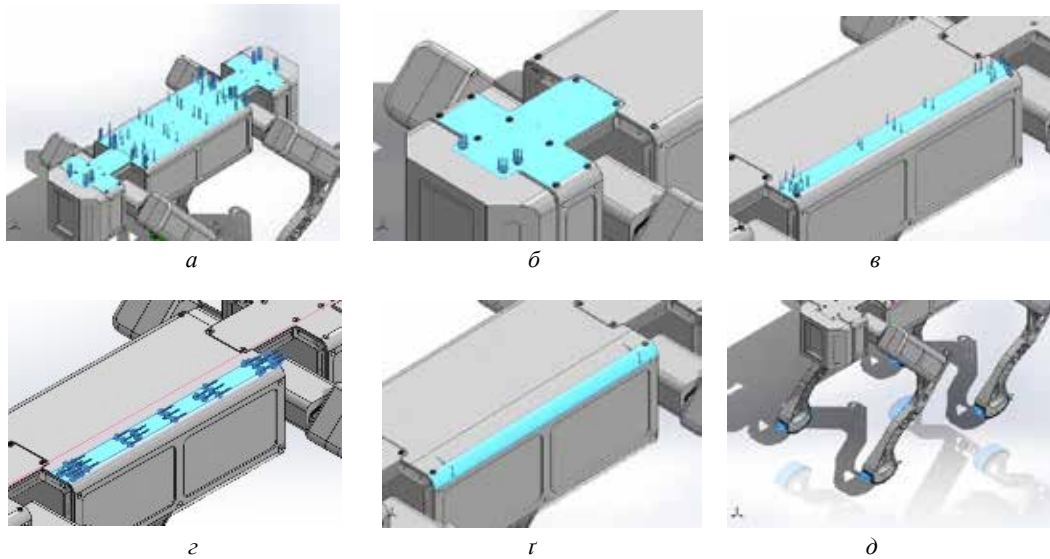
#### Дослідження конструкції

Середовище моделювання: Дослідження статичного навантаження були проведені у модулі SolidWorks Simulation. Вибір обумовлений наявністю широкого спектру можливостей моделювання об'єктів та фізичних процесів і явищ.

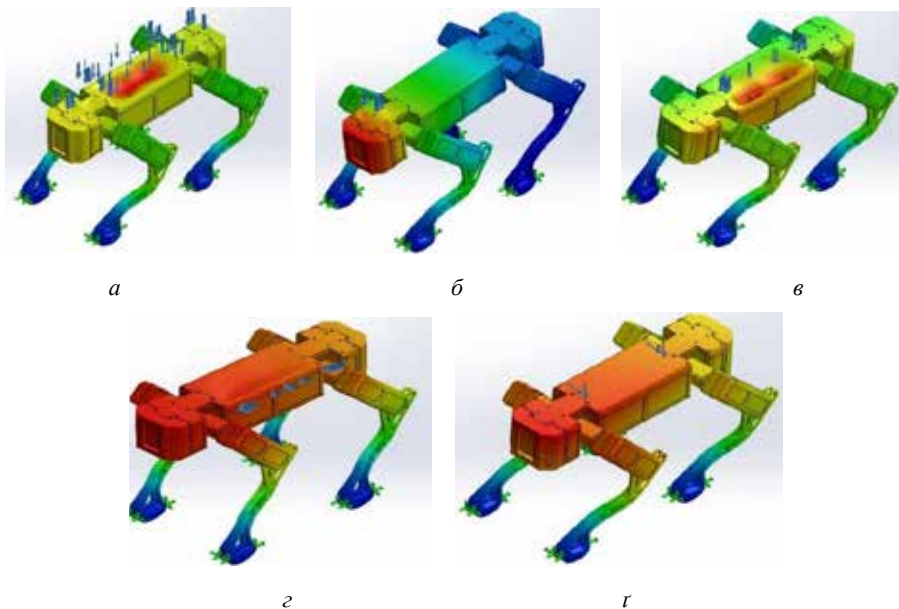
Опис дослідження: Завданням моделювання є перевірка вантажопід'ємності робота, враховуючи що середня  $m$  тіла людини сягає 150 кг і більше, перевірка здатності конструкції витримувати прикладені навантаження  $P$ , які не передбачено стандартними умовами експлуатації. Як точку відліку, назвемо її  $O$ , візьмемо центр верхньої площини середньої кришки (верхньої). Всі результати будуть розглядатись відносно неї. Місця прикладання навантажень, позначені у вигляді площин, наведено на (рис. 6)

#### Результати досліджень

Дослід № 1 імітує стандартне навантаження робота, що транспортує вантаж, у такому випадку верхня платформа робота навантажена рівномірно  $m=25\dots250$  кг (рис. 6, а). За таких умов спостерігається дефект центральної частини, проте він легко усувається, наприклад, створенням додаткових ребер жорсткості. Під максимальним навантаженням  $P_{max}$  (250 кг, ідентичне для всіх дослідів) тіло робота зазнало зміщення  $u$  приблизно на  $-32,00$  мм, але інших суттєвих деформацій не виявлено, окрім вище зазначеної, що підтверджується (рис. 7 а) та (рис. 8 а, б). В умовах навантаження мінімальною масою  $P_{min}$  (25 кг, ідентичне



**Рис. 6. Площини прикладання навантажень та місце фіксації моделі:**  
а – дослід 1, б – дослід 2, в – дослід 3, г – дослід 4, д – місце фіксації



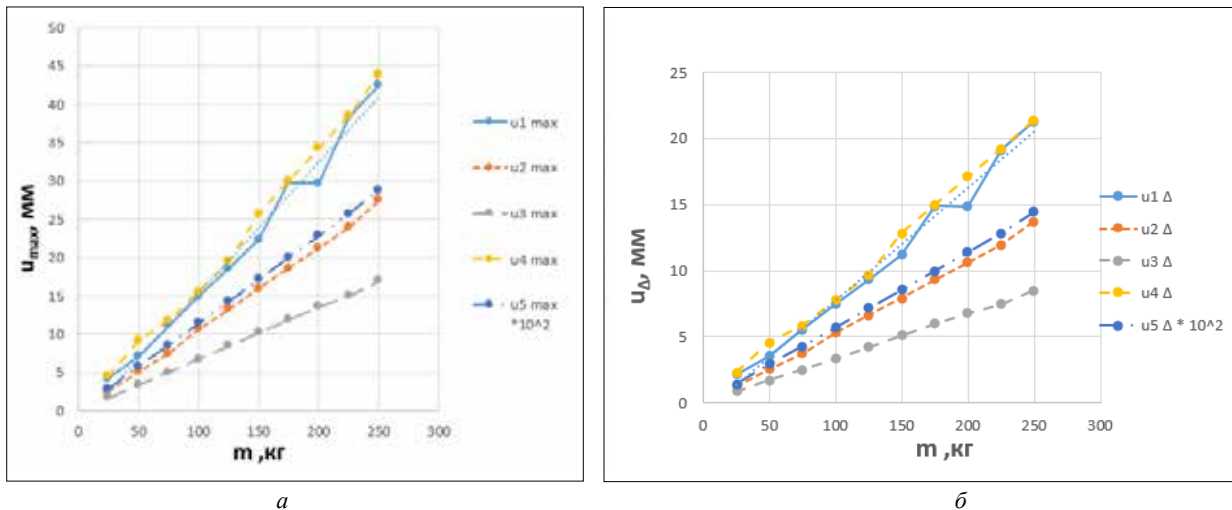
**Рис. 7. Градієнти змішень:**  
а – дослід 1, б – дослід 2, в – дослід 3, г – дослід 4, д – дослід 5

для всіх дослідів)  $u = -3,20$  мм. Отже, дослід № 1 підтверджує придатність конструкції для утримання  $P = 150$  кг за стандартних умов експлуатації робота.

Дослід № 2 відтворює ситуацію зміщення вантажу по довжині лівіше центральної точки, або нерівномірного навантаження верхньої площини робота (рис. 6 б), . Такий випадок є стандартним для вантажних платформ, а тому обов'язковий для перевірки. Під час проведення дослідів суттєвих дефектів чи деформацій не виявлено (рис. 7 б). максимальне зміщення  $u_{max} = -27,42$  мм і відповідає нахилу тіла конструкції під навантаженням,

яке можна вважати стандартною реакцією під час статичного дослідження. Мінімальне зміщення  $u_{min} = -2,55$  мм, його можна вважати несуттєвим. Дослід № 2 підтверджує можливість конструкції витримувати нерівномірне навантаження верхньої площини робота масою, що вказана вище.

У досліді № 3 перевірялась реакція конструкції на навантаження, яке не передбачено стандартними умовами експлуатації, проте є імовірним за певних екстремальних умов на (рис. 6, в). Тут навантаження є нерівномірним і сконцентроване на невеликій площі передньої частини платформи. Із (рис. 7 в) видно, що конструкції



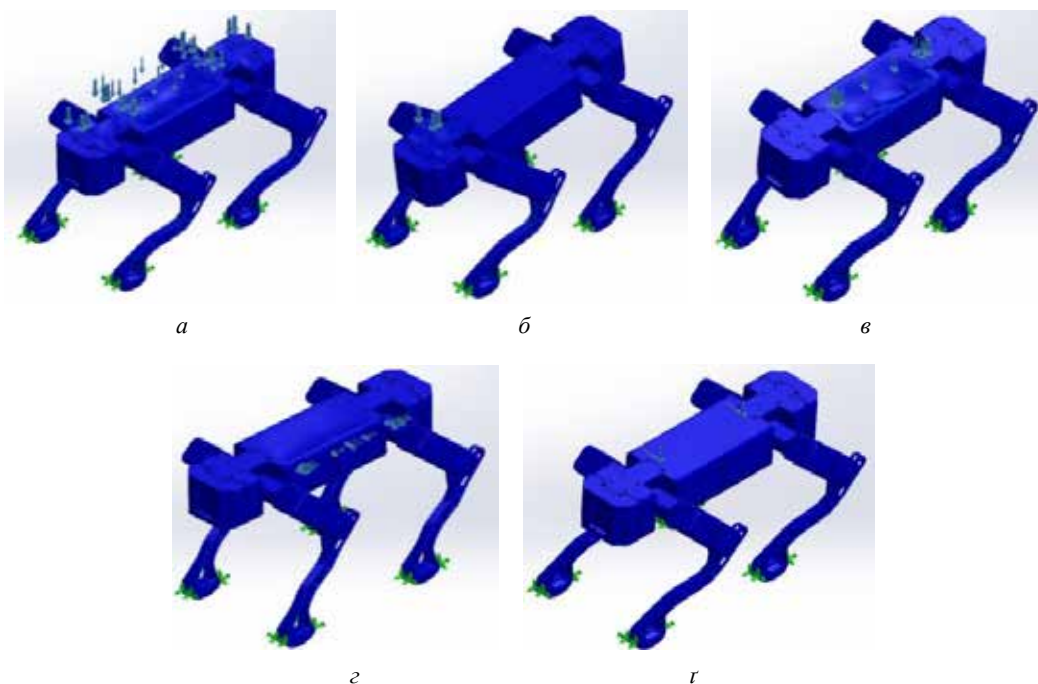
**Рис. 8. Графіки зміщень:**  
а – максимальних, б – середніх

нахилилась вбік прикладання навантаження і весь корпус в середньому  $u = -8,50$  мм під  $P_{min}$  (250 кг) та  $u = -0,84$  мм під  $P_{min}$  (25 кг). Під  $P_{max}$  нахил склав близько  $-15$  мм, у той час під  $P_{min}$  він становив приблизно  $-1,51$  мм. Слід відзначити, на (рис. 7 в) можна спостерігати помірну деформацію однієї сторони корпусу і знайомий з дослідом № 1 дефект (рис. 5, а). Висновок, хоч конструкція і витримала збурення, все ж, такий тип прикладання навантаження є небажаним під час використання робота.

Дослід № 4 є частковим випадком досліду № 3,  $P$  прикладаються під кутом  $45^\circ$  (рис. 6, г). Такий

випадок також не відповідає стандартним умовам експлуатації робота, але все ж імовірний. Як показують результати (рис. 7 г), у такому випадку верхня кришка може зазнати деформації, а сам робот, враховуючи, що:  $u_{min} = 4,50$  мм та  $u_{max} = 42,8$  мм відносно початкової позиції буде виведено зі стану рівноваги. Даний випадок потребує подальших додаткових досліджень щодо стабілізації конструкції.

Дослід № 5 відтворює прикладання моменту сили до верхньої частини корпусу під кутом  $45^\circ$  (рис. 6, г). Такий випадок можливий при спробі силового впливу на конструкцію робота (штов-



**Рис. 9. Градієнти напружень:**  
а – дослід 1, б – дослід 2, в – дослід 3, г – дослід 4, г – дослід 5



хання). Навіть під час першої ітерації досліду ( $P_{min}=25$  кг) спостерігається значне  $u=-28$  мм та його десятикратне збільшення під  $P_{max}$  (рис. 7, г), що свідчить про гарантоване виведення конструкції зі стану рівноваги та неприпустимість таких дій. Аналогічно четвертому досліду, методи компенсації такого навантаження потребують подальших досліджень.

Проаналізуємо напруження (рис. 9). Беручи до уваги, що градієнт розподілу навантажень рівномірний та відповідає лише мінімальним значенням, нас будуть цікавити лише мінімальні значення  $\sigma_{min}$ . Ті, що відповідають ( $\sigma_{max}$ ) мають точковий характер та несуттєвий вплив на запропоновану конструкцію робота.

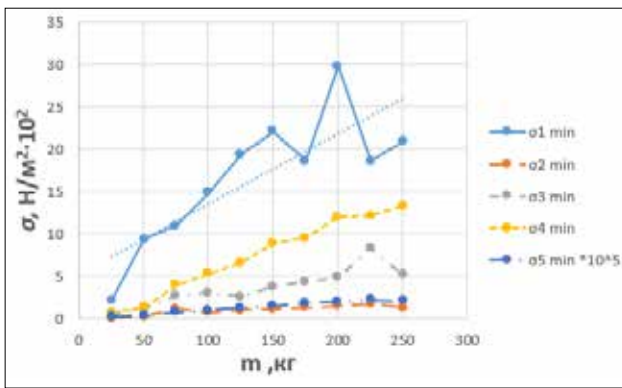


Рис. 10. Графіки мінімальних напружень

Значення  $\sigma_{min}$  (рис. 10) можна вважати достовірними, бо лише графік першого дослідів потребував кореляцію, всі інші мають стабільний та, в цілому, пропорційний приріст.

Як було зазначено раніше, градієнт розподілу напружень рівномірний та однотонний, наявність відхилень від цієї парадигми виключно точковий і, у той же час, мінімальний. Можна стверджувати, що відносно показників напружень конструкцію можна вважати надійною.

**Висновки.** Як показують дослідів № 1 і № 2, найбільша деформація ( $u_{max}=-32,00$  мм і  $u_{max}=-27,42$  мм відповідно) спостерігається в околі точки О, отже у наступних моделях конструкції ця зона потребує додаткового підсилення, наприклад, шляхом встановлення опор або додаткових ребер жорсткості. Проте вказаний прояв не є критичним і конструкція все ж витримує  $P_{max}=250$  кг, що також підтверджується дослідівми № 3, 4 і 5. При проведенні вказаних дослідів чітко видно, що робот здатен витримувати більш екстремальні навантаження. Наприклад, результати дослідів № 2, 3, 4 та 5 доводять, що конструкція робота стійка до нерівномірно прикладених зусиль відносно центральної точки корпусу.

Водночас аналіз конструкції відносно напружень вказує на те, що градієнт розподілу вищезазначеної величини є рівномірним та однотонним, екстремуми відсутні, а наявність відхилень точкова і, у той же час, мінімальна. На підставі цього можна стверджувати, що відносно показників напружень конструкція вважається надійною.

Остаточо, враховуючи завдання моделювання, а саме стійкість до прикладених навантажень, можна вважати, що конструкція витримує  $P=150$  кг, що відповідають середній вазі дорослої людини [9], та має відповідний запас на рівні більше 20%.

### Список літератури:

- КОМЕНТАРИИ.UA. Приклад руйнувань у Бородянці. URL: <https://kyiv.comments.ua/news/society/developments/9080-v-borodyanke-nachali-razbirat-zavaly-strashno-dazhe-spatatelyam-foto-video.html> (дата звернення 25.06.2022).
- LB.ua. Руйнування школи після ракетного удару по Житомирській області. URL: [https://lb.ua/society/2022/03/04/507940\\_zhitomiri\\_vorog\\_vdariv\\_shkoli.html](https://lb.ua/society/2022/03/04/507940_zhitomiri_vorog_vdariv_shkoli.html) (дата звернення 25.06.2022).
- LancsLive URL «Mountain rescuers scrambled to Scafell Pike in dramatic 22-person Lake District operation». URL: [https://www.lancs.live/news/local-news/mountain-rescuers-scrambled-scafell-pike-23836020?utm\\_source=linkCopy&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=sharebar](https://www.lancs.live/news/local-news/mountain-rescuers-scrambled-scafell-pike-23836020?utm_source=linkCopy&utm_medium=social&utm_campaign=sharebar) (дата звернення 25.06.2022).
- Офіційний сайт unitree. Інформаційна сторінка робота Go1. URL: <https://shop.unitree.com/products/unitreeyushutechnologydog-artificial-intelligence-companion-bionic-companion-intelligent-robot-go1-quadruped-robot-dog>
- Офіційний сайт deeprobotics. Інформаційна сторінка робота Jueying. URL: [https://www.deeprobotics.cn/en/products\\_jy\\_302.html](https://www.deeprobotics.cn/en/products_jy_302.html)
- Офіційний сайт bostondynamics. Інформаційна сторінка робота Spot. URL: <https://www.bostondynamics.com/products/spot>
- Hui Chai. Research and implementation on compliance and force control of hydraulically actuated quadruped robot. Jinan: Shandong University, 2016: 15–18. (in Chinese) DOI:10.1177/1729881418813235
- He and Gao Chin. J. Mech. Eng. (2020) 33:79 <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00485-9>

9. Medically reviewed by Alana Biggers, M.D., MPH – Written by James Roland – Updated on March 7, 2019. URL: <https://www.healthline.com/health/mens-health/average-weight-for-men>

10. A Sprowitz, A Tuleu, M Vespignani, et al. Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with Cheetah-cub, a compliant quadruped robot. The International Journal of Robotics Research, 2013.

**Sazonov A.Yu., Cherednychenko V.I., Cherepanska I.Yu. SIMULATION OF KINEMATIC AND STATIC PARAMETERS OF MOBILE WALKING RESCUE ROBOT**

*The article will consider the potential and application spheres for the walking robot, and present an analysis of the prototype construction of a mobile walking robot capable of transporting injured people in emergencies. Also, we will introduce forward kinematics for the above-mentioned type of robots and the simulation results to confirm the operability of the proposed prototype design. Further, the authors will conduct an analysis of the specified problem, namely the evacuation of injured people as a result of emergencies, and man-made disasters, characterized by a complex landscape, which confirms the relevance of conducting research in this area. After all, the authors will analyze the existing variants of mobile walking robots and determine their advantages and disadvantages. Then, for the proposed design of the mobile walking robot forward kinematics will be introduced in a unified form. Next, the theoretical prototype design (three-dimensional model) of the developed mobile walking robot will be presented. In addition to that, the article conducted a static study of the prototype of the developed model of a mobile walking robot, which aimed to maintain a mass equal to 150 kg or more. This choice was made since the average weight humane is about 90 kg. In addition to the nominal load, it is necessary to have a so-called margin of strength and stability, a value that should be two-thirds of the nominal load. Structure durability test will be performed in the Solidworks Simulation module, which provides qualitative modelling and testing of three-dimensional objects and the ability to study a wide range of parameters.*

**Key words:** *solid modeling, forward kinematics, walker, load gradient, displacement, evacuation.*

**Хлопенко І.М.**

Херсонська державна морська академія

## РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СУДНОВОГО ДВОСТУПІНЧАСТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА ПРИ ВЕКТОРНОМУ КЕРУВАННІ З РОБАСТНИМ РЕГУЛЯТОРОМ В КАНАЛІ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ

Метою роботи є розрахунок перехідних процесів в асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого компресора з прямим кутом розвалу при векторному керуванні з робастним регулятором в каналі потокозчеплення. Для проведення досліджень розроблено методологію наукового дослідження перехідних процесів в асинхронному електроприводі поршневої повітряної компресорної установки при векторному керуванні. Запропоновано структурну схему системи векторного керування з робастним регулятором у контурі потоку асинхронного електроприводу такої установки. За створеною раніше математичною моделлю розрахована передавальна функція  $H_{\infty}$ -субоптимального робастного регулятора за методом мішаної чутливості. Визначено статичний момент сил тертя, діючих на електродвигун, за індикаторними діаграмами та заданим механічним ККД. Наведені формули моментів приведені до кривошипну діючих тисків повітря на поршні компресора. Проведено розкладання цих моментів за гармоніками до рядів Фур'є до п'ятнадцятого порядку включно в пакеті MathCAD. Побудовані графічні залежності приведені до кривошипну моментів сил тиску повітря на поршні компресора від кута повороту жорсткого валу, обчисленими за частковими сумами рядів Фур'є та без їх розкладання в ряди Фур'є. Отримано добрий збіг результатів розрахунку за обома формулами, крім кількох точок, при заданому числі членів ряду, рівному п'ятнадцяти. Побудовано схему моделювання перехідних процесів в асинхронному електроприводі компресорної установки з урахуванням приведені до кривошипну моментів діючих сил тертя, періодичних газових сил і сил тяжіння поступово рухомих мас кривошипно-шатунного механізму в пакеті Simulink. Моменти вказаних сил тяжіння визначалися за формулами, запропонованими раніше. На конкретному прикладі досліджено перехідні процеси в електроприводі суднової V-подібної компресорної установки з жорстким валом, що складається з ротора асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, колінчастого валу компресора та маховика. Показано, що розмахи усталених параметричних коливань кутової швидкості жорсткого валу знаходяться в межах допусків при високоточній стабілізації потокозчеплення робастним регулятором, зміні знака циклічно повторювального навантаження і коливаннях електромагнітного моменту в робочій області роботи електричної машини. Бібл. 11, рис. 4.

**Ключові слова:** двоступінчастий поршневий компресор, асинхронний електродвигун, система векторного керування, робастний регулятор в контурі потоку, перехідні процеси.

**Постановка проблеми.** У суднових системах стисненого повітря для пуску та реверсування головних двигунів широко використовуються двоступінчасті поршневі компресори V-подібного типу з прямим кутом розвалу і загальним для нижніх головок шатунів коліном колінчастого валу (КВ) кривошипно-шатунного механізму (КШМ), що приводяться в дію асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором. Забезпечення ефективної та надійної роботи таких установок є важливою проблемою. Окремі аспекти цієї проблеми вивчалися аналітично багатьма дослідниками, огляд робіт яких викладено у працях [1, 2]. Як показали теоретичні та експериментальні дослідження та практика експлуатації

компресорних установок, основною причиною їх відмов є крутильні коливання жорсткої механічної системи, що складається з ротора електродвигуна, КВ компресора та маховика [2, 3]. Ці коливання носять циклічний характер внаслідок періодичності процесу навантаження жорсткого валу крутильної системи та протікають із суттєвими витратами енергії на керування. Ефективним способом зниження цих витрат енергії на крутильні коливання є автоматичне регулювання швидкості електроприводу (ЕП) на перехідних та усталених режимах. У роботі [4] таке регулювання швидкості асинхронної машини здійснюється системою частотного керування. Однак система частотного керування [4] асинхронним ЕП компресорної

установки поступається, як відомо, за низкою показників системі векторного керування з робастним регулятором у контурі потокозчеплення [5]. Тому дослідження перехідних процесів в асинхронному ЕП компресорних установок при векторному керуванні [5] є важливим та актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створення математичних моделей і методик різного рівня складності, що описують перехідні процеси в нерегульованих ЕП двоступінчастих поршневих компресорів з поршнями, що протилежно рухаються, викладено в роботах [3, 6]. В них питання про зниження рівня вимушених крутильних коливань жорсткого валу, що складається з ротора двигуна, колінчастого валу компресора і маховика, за рахунок регулювання ЕП не розглядалося. Однак добре відомо, що заміна нерегульованого електроприводу на регульований дозволяє суттєво знизити споживання енергії, збільшити термін служби механічної частини електроприводу та підвищити якість регулювання кутової швидкості асинхронної машини. У зв'язку з цим нами у роботі [4] було використано принцип скалярного керування асинхронного ЕП суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу. Дослідження проводилися за запропонованою в ній оригінальною методикою, яка враховує багато факторів, які раніше іншими дослідниками не враховувалися або враховувалися не повною мірою. Проте скалярний принцип керування поступається за низкою показників векторному керуванню з робастним регулятором в контурі потокозчеплення [5]. Найважливішими з цих показників є швидка реакція на зміну навантаження, завдяки якій при зміні навантаження прак-

тично не відбувається зміна швидкості; збільшений діапазон та висока точність регулювання швидкості; знижуються втрати на нагрівання та намагнічування, підвищується ККД електродвигуна. Тому застосування векторного принципу керування асинхронних ЕП компресорів є доцільним.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи є розрахунок перехідних процесів в асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого компресора з прямим кутом розвалу при векторному керуванні з робастним регулятором в каналі потокозчеплення.

Для досягнення цієї мети необхідно на основі існуючих теоретичних досліджень розробити методологію наукового дослідження, структурну схему системи векторного керування ЕП компресора, схему моделювання перехідних процесів кутової швидкості вимушених параметричних коливань жорсткого валу при регулярних коливаннях електромагнітного моменту і навантаження в пакеті Simulink, а також виконати розрахунки та провести аналіз отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На рис. 1 представлена структурна схема системи векторного керування асинхронного ЕП компресора. Вона побудована із залученням робіт [5, 7, 8].

Схема містить керований за модулем вектора потокозчеплення ротора двигуна контур потоку з робастним регулятором [8, 9] і двоконтурний канал підпорядкованого регулювання швидкості з П-регулятором у зовнішньому контурі та ПІ-регулятором струму у внутрішньому контурі [7, 11].

Канал контуру потоку включає в себе передавальні функції коригуючого фільтра у вигляді аперіодичної ланки з постійною часу  $T_{pr}$ , робастного

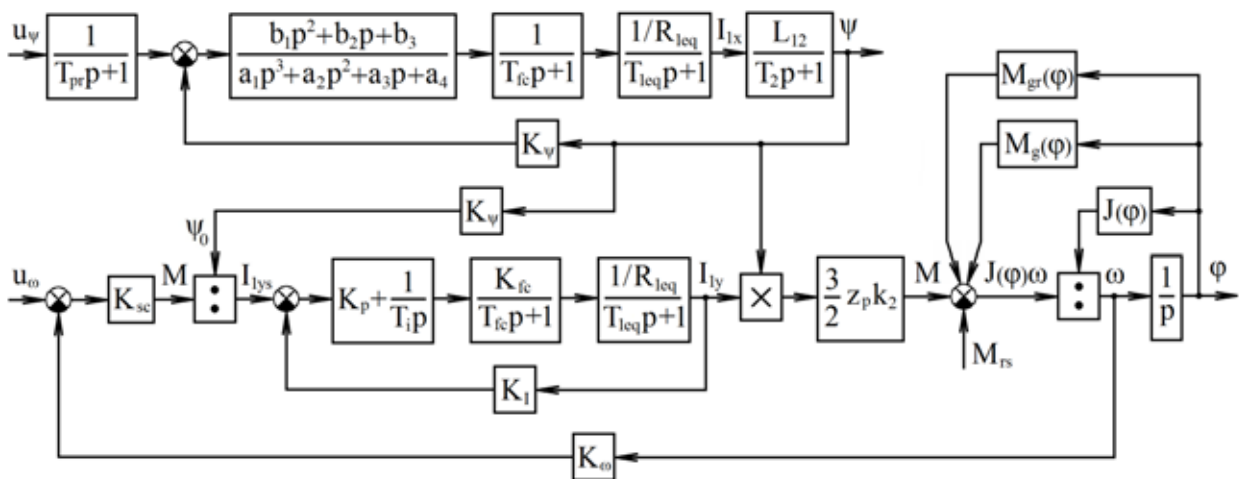


Рис. 1. Структурна схема векторного керування електропривода компресора

регулятора третього порядку з коефіцієнтами  $b_1, b_2, b_3$  полінома чисельника і коефіцієнтами  $a_1, \dots, a_4$  полінома знаменника, перетворювача частоти з безрозмірним одиничним передавальним коефіцієнтом [8] та постійної часу  $T_{fc}$ , аперіодичної ланки обмотки статора з еквівалентним опором  $R_{1eq}$  та еквівалентної електромагнітної постійної часу  $T_{1eq}$  кіл статора та ротора, а також аперіодичної ланки ротора з взаємною індуктивністю статора та ротора  $L_{12}$  та постійною часу  $T_2$ . Контур потоку замкнений неединичним зворотним зв'язком з коефіцієнтом підсилення  $K_\psi = u_\psi / \psi_b$  (індекс  $b$  позначає базове значення) за модулем  $\psi$  вектора потокозчеплення ротора.

Канал підпорядкованого регулювання швидкості містить передавальні функції пропорційного регулятора з коефіцієнтом передачі  $K_{sc}$ , ПІ-регулятора струму з передавальним коефіцієнтом  $K_p$  і постійною часу  $T_i$ , перетворювача частоти з передавальним коефіцієнтом  $K_{fc}$  і постійною часу  $T_{fc}$ , аперіодичної ланки обмотки статора, електромагнітного моменту  $M$  електричної машини з короткозамкненим ротором, жорстко пов'язаним з колінчастим валом, і приведеним до осі обертання КВ моментом інерції  $J(\varphi)$  поступово рухомих і обертових мас КШМ, що залежать від кута повороту  $\varphi$  кривошипа першого ступеня компресора [4]. На структурній схемі момент інерції  $J(\varphi)$  зображений окремим блоком. Значення коефіцієнта підсилення пропорційної ланки, що зв'язує вхід модуля  $\psi$  вектора потокозчеплення та вихід сигналу потокозчеплення  $\psi_0$ , що надходить на дільник, збігається зі значенням коефіцієнта підсилення  $K_\psi$  контуру потоку. Тому коефіцієнт підсилення цієї ланки має таке саме позначення, як і коефіцієнт підсилення потоку, проте відрізняється від нього тим, що не має розмірності.

Навантаження на двигун  $M_i(\varphi)$ , що залежить від кута повороту  $\varphi$ , представлено на схемі двома блоками та блоком ступінчастого сигналу з постійним моментом сил тертя  $M_{rs}$ . Перший блок  $M_{gr}(\varphi)$  позначає приведений до кривошипу рівнодіючий момент  $M_{gr}(\varphi)$  сил тяжіння поршнів з приведеною до кожного з них 1/3 маси шатуна. Другий блок  $M_g(\varphi)$  зображує сумарний момент  $M_g(\varphi)$  діючих на поршні компресора газових сил, приведених до кривошипу. Підсумовування моментів здійснюється суматором.

Внутрішній контур струму каналу підпорядкованого регулювання замкнений за струмом неединичним зворотним зв'язком з коефіцієнтом підсилення  $K_I = u_\omega / I_{1yb}$ , а зовнішній контур швидкості – неединичним зворотним зв'язком за

кутовою швидкістю  $\omega$  з коефіцієнтом підсилення  $K_\omega = U_\omega / \omega_b$ . Напруги датчиків  $U_\psi$  і  $U_\omega$  відповідають стандартним значенням 10 В.

Структурна схема також містить ланку затримки сигналу часу, необхідного для продування компресора, і пропорційну ланку тиску повітря в емності для його зберігання. Ці елементи на рисунку не показані.

Момент інерції  $J(\varphi)$  компресорної установки розраховується за формулою:

$$J(\varphi) = J_0 + m_1 r^2 f_1(\varphi) + m_2 r^2 f_1(\varphi + \gamma), \quad (1)$$

де

$$f_1(\varphi) = \sin^2 \varphi + \lambda \sin \varphi \cdot \sin 2\varphi; \quad (2)$$

$J_0$  – приведений до нерухомої осі обертання кривошипа постійний момент інерції, що дорівнює сумі моментів інерції ротора електродвигуна, маховика колінчастого валу та приведеної до осі шатунної шийки колена колінчастого валу 2/3 маси обох шатунів;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $r$  – радіус кривошипу;  $m_1, m_2$  – відповідно сумарна маса поршня, поршневих кілець, пальця верхньої головки шатуна та 1/3 маси шатуна, приведеної до поршня першої (індекс 1) та другої (індекс 2) ступені;  $\lambda = r/l$  – відношення радіуса  $r$  кривошипу до довжини  $l$  шатуна;  $\gamma = 3\pi/2$  рад.

Вираз (2), як показано в роботі [4], є наближеним. Він відрізняється від точного значення не більше, ніж на 2,25 % при значеннях  $\lambda \leq 0,15$ .

Формула приведенного до кривошипу моменту сил тяжіння поступально рухомих мас поршнів з кільцями, пальцями та 1/3 маси шатунів має вигляд:

$$M_{gr}(\varphi) = gr \cos \frac{\pi}{4} [m_1 f_2(\varphi) + m_2 f_2(\varphi + \gamma)], \quad (3)$$

де

$$f_2(\varphi) = \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi.$$

Рівнодіючий момент приведених до кривошипу моментів періодично діючих тисків повітря на поршні компресора описується виразом [4]:

$$M_g(\varphi) = M_{g1}(\varphi) + M_{g2}(\varphi + \gamma), \quad (4)$$

де

$$M_{gs} = r \frac{\pi d_s^2}{4} \left[ \sin \varphi + 0,5\lambda \frac{\sin 2\varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right] p_s(\varphi)$$

$$(s = 1, 2); \quad (5)$$

$d_s$  – діаметр поршня  $s$ -го циліндру, а тиск  $p_s(\varphi)$  розраховується за формулами, наведеними в роботі [4].

Вирази (5) є нелінійними. Вони не піддаються моделюванню у пакеті Simulink. Тому проводять їх гармонійну лінеаризацію із залученням рядів Фур'є. У роботі [4] така лінеаризація проводилася лише для тисків  $p_s(\varphi)$ . У цій роботі вона проводиться для всього виразу (5). Отримані при цьому часткові суми гармонік рядів Фур'є  $m$ -го порядку включно мають вигляд:

$$M_{gs}(\varphi, m) = \frac{a_{0s}}{2} + \sum_{n=1}^{n=m} A_{ns} \sin(n\varphi + \psi_{ns}) \quad (s = 1, 2), \quad (6)$$

де;  $a_{0s}$  – постійний коефіцієнт;  $A_{ns}$  – амплітуда гармоніки;  $\psi_{ns}$  – початкова фаза;  $n$  – порядок гармоніки. Індекс  $s=1$  відноситься до першої ступені, а  $s=2$  – до другої ступені компресора.

Нижче на конкретному прикладі розрахунковим шляхом буде встановлено, що формула (6) має добру збіжність при порівняно невеликій кількості  $m$  членів ряду. Тому її застосування для розрахунку моменту (4) періодично діючих тисків повітря на поршні компресора є переважним.

Момент тертя, що перешкоджає обертанню електродвигуна, визначається за формулою [10]:

$$M_{rs} = \frac{N_i}{\omega_n} \left( \frac{1}{\eta_m} - 1 \right), \quad (7)$$

де  $N_i = N_{i1} + N_{i2}$  – сума індикаторних потужностей компресора, причому для ступені з індексом  $s$

$$N_{is} = \frac{k}{k-1} p_{0s} V_{hs} \frac{\omega_n}{2\pi} \left[ 1 - a_s \left( \frac{1}{\varepsilon_s^k} - 1 \right) \right] \left( \frac{k-1}{\varepsilon_s^k} - 1 \right) \quad (s = 1, 2); \quad (8)$$

$k = 1,4$  – показник адиабати;  $p_{0s}$  – тиск повітря на вході в циліндр  $s$ -ої ступені;  $V_{hs} = 0,5\pi d_s^2 r$  – робочий об'єм  $s$ -ого циліндра;  $\varepsilon_s$  – ступінь стиснення повітря в  $s$ -му циліндрі, причому  $\varepsilon_1 = V_{h1} (1 + a_1) / V_{h2} (1 + a_2)$  при охолодженні повітря після першої ступені до рівних значень температур на вході в циліндри, а ступінь стиснення у другому циліндрі  $\varepsilon_2 = p_{\max} / \varepsilon_1$  ( $p_{\max}$  – заданий максимальний тиск);  $a_s$  – відносний мертвий об'єм  $s$ -ого циліндра;  $\omega_n$  – номінальна кутова швидкість електродвигуна;  $\eta_m$  – механічний ККД.

Сумарне навантаження на двигун від дії на жорсткий вал компресорної установки моментів сили тяжіння (3), газових сил (4) та сил тертя (7) розраховувалося за формулою (9):

$$M_r(\varphi) = M_{rs} - M_{gr}(\varphi) - M_g(\varphi). \quad (9)$$

Зауважимо, що у цій формулі два останні доданки, взяті з протилежним знаком, відповідають початковому переміщенню кривошипа

проти ходу годинникової стрілки з положення, що займається поршнем першого циліндра компресора у верхній мертвій точці.

Передавальна функція робастного регулятора розраховувалася за методикою [8]. Приведений до осі ротора електродвигуна момент інерції компресора  $J(\varphi)$  і навантаження  $M_r(\varphi)$  на асинхронний двигун визначалися за формулами (1) і (9), а інші параметри структурної схеми – за методикою, запропонованою в роботах [7; 11].

Розрахунок перехідних процесів в асинхронному ЕП при векторному керуванні з робастним регулятором в контурі потоку здійснювався для компресорної установки WP 22L фірми Sauer. Ця установка складається з V-подібного дво-ступінчастого поршневого компресора з прямим кутом розвалу та асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Нижні головки шатунів КШМ компресора посаджені на загальне коліно колінчастого валу. Характеристики компресора відповідають даним, наведеним у роботі [4]. Асинхронним двигуном установки є електрична машина НМА2 1328-4 з такими даними: потужність  $P_n = 5,3$  кВт; номінальна частота обертання 1460 об/хв; напруга 400 В; номінальний момент  $M_n = 34,67$  Н·м; пусковий момент 83,2 Н·м; номінальний струм статора 10,63 А; момент інерції 0,033 кг·м<sup>2</sup>; частота мережі  $f = 50$  Гц. Двигун нерегульований.

Вихідними даними для розрахунку служили наступні величини:  $T_{pr} = 2,5$  с;  $b_1 = 1,594 \cdot 10^5$ ;  $b_2 = 1,252 \cdot 10^6$ ;  $b_3 = 2,219 \cdot 10^7$ ;  $a_1 = 1$ ;  $a_2 = 3,854 \cdot 10^3$ ;  $a_3 = 2,811 \cdot 10^5$ ;  $a_4 = 1,471 \cdot 10^5$ ;  $K_{fc} = 32,66$ ;  $T_{fc} = 0,001$  с;  $R_{1eq} = 1,5956$  Ом;  $T_{1eq} = 0,00591$  с;  $k_2 = 0,968$ ;  $L_{12} = 0,1684$  Гн;  $T_2 = 0,2611$  с;  $K_{sc} = 75,93$  Н·м/В;  $K_p = 0,6426$  В/А;  $T_i = 0,009195$  с;  $K_1 = 0,2246$ ;  $K_{\omega} = 0,06366$  В·с/рад;  $z_p = 2$ ;  $k_2 = 0,9680$ ;  $J_0 = 1,35$  кг·м<sup>2</sup>;  $\eta_m = 0,8$ . Момент тертя, розрахований за формулами (7, 8),  $M_{rs} = 4,31$  Н·м. Тиск повітря в ємності в процесі її заповнення змінювався від 25 до 28 МПа. Інші параметри такі самі, як і в роботі [4]. Втрати енергії в самодіючих клапанах не враховувалися.

На рис. 2 представлені графічні залежності приведених до кривошипу моментів сил тиску повітря на поршні циліндрів першої (а) та другої (б) ступені компресора від кута повороту  $\varphi$  жорсткого валу, обчислені за формулами (6) часткового ряду Фур'є (суцільна лінія) і виразами (5) (точкова лінія) без їх розкладання в ряди Фур'є.

Отримано добрий збіг цих залежностей, крім кількох точок, при заданому числі  $m=15$  членів гармонійного ряду Фур'є.

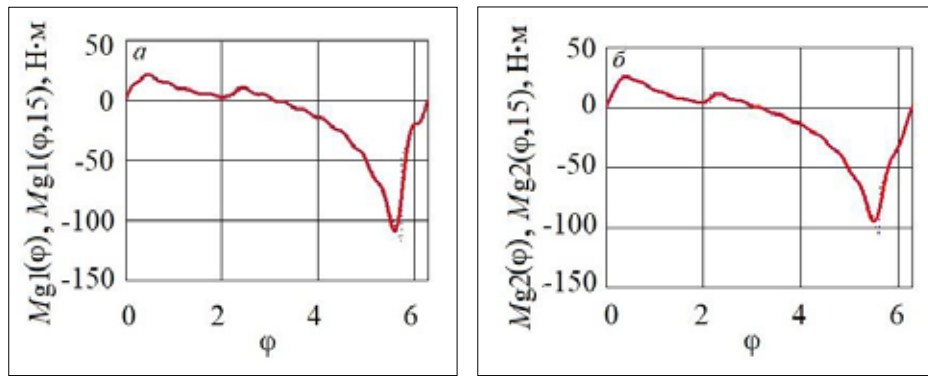


Рис. 2. Приведені до кривошипу моменти сил тисків повітря на поршні циліндрів першої (а) та другої (б) ступені компресора:  $Mg1(\phi)$ ,  $Mg2(\phi)$  – точкова лінія;  $Mg1(\phi,15)$ ,  $Mg2(\phi,15)$  – суцільна лінія

В табл.1 представлені базисні величини, розраховані за формулами роботи [11].

Таблиця 1

Базисні величини для побудови графіків

Фізичний параметр	Базисна величина	Формула	Значення
Струм в каналі потоку	Амплітудне значення	$I_{1xb} = I_{1ab}$	5,758 А
Струм в каналі швидкості	Амплітудне значення	$I_{1yb} = I_{1\beta b}$	44,524 А
Потокозчеплення	Номінальне значення потокозчеплення ротора	$\Psi_b = L_{12} I_{1xb}$	0,9698 Вб
Кутова швидкість	Синхронна кутова швидкість поля статора	$\omega_b = \frac{2\pi f}{z_p}$	157,08 рад/с
Кратність пускового моменту	Відношення критичного моменту до номінального моменту	$k_{kr} = \frac{M_{kr}}{M_n}$	3,4
Електромагнітний момент	Відношення критичної потужності до базисної кутової швидкості поля	$M_b = k_{kr} \frac{P_n}{\omega_b}$	114,7 Н·м

Вони використовувалися при побудові графіків безрозмірних перехідних процесів в асинхронному ЕП компресора. Ці графіки для безрозмірних величин потокозчеплення  $\psi/\psi_b$ , кутової швидкості жорсткого валу  $\omega/\omega_b$  та електромагнітного моменту  $M/M_b$  двигуна компресорної установки із спільним коліном КВ при подачі безрозмірного одиничного завдання за швидкістю і за моментом тертя через 4 с після включення завдання за потокозчепленням представлені на рис. 3.

Із цих графіків видно, що на початковій ділянці пускової характеристики потокозчеплення ротора  $\psi/\psi_b$  плавно зростає за рахунок коригувальної аперіодичної ланки і форсованого зростання електромагнітного моменту  $M/M_b$  двигуна, а потім з моменту часу близько 12,5 с підтримується робастним регулятором незмінним при зниженні електромагнітного моменту до усталеного коливального режиму з відносним розмахом близько

2%. При цьому забезпечується стабілізація безрозмірної кутової швидкості  $\omega/\omega_b$  жорсткого валу при параметричних коливаннях з розмахом, що не перевищує 0,26%.

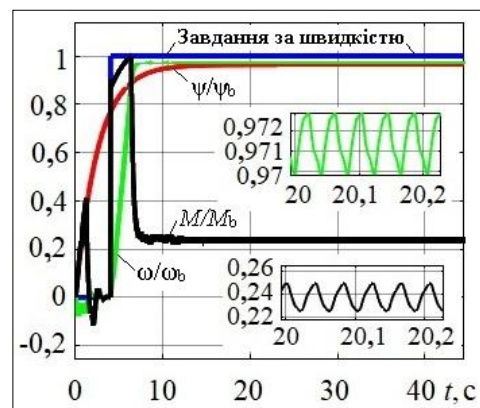


Рис. 3. Перехідні процеси в асинхронному електроприводі компресора

На рис. 4 показані результати розрахунків приведенного до кривошипу безрозмірного циклічно навантажувального моменту  $M_r/M_b$  на двигун при пуску компресора, рівного алгебраїчній сумі безрозмірних моментів періодичних газових сил, сил тяжіння поступально рухомих мас КШМ з приведеними масами шатунів і безрозмірного моменту сил тертя.

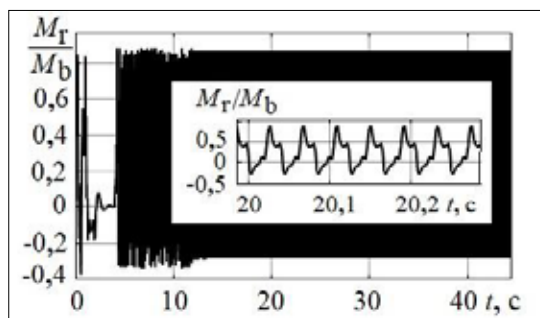


Рис. 4. Залежність безрозмірного моменту  $M_r/M_b$  від часу  $t$  при пуску компресора з одним коліном колінчастого валу

З рис. 4 видно, що на усталеному режимі безрозмірне навантаження, що діє на жорсткий вал компресорної установки, носить регулярний коливальний характер з розмахом, що не перевищує базового значення, і перетинає вісь абсцис. Однак його від'ємні значення не впливають на роботу асинхронної електричної машини в режимі електродвигуна.

Слід також зазначити, що при розрахунках перехідних процесів і навантаженнях на жор-

сткий вал компресора найбільші амплітудні значення безрозмірних струмів  $I_{1x}/I_{1xb}$  і  $I_{1y}/I_{1yb}$  виявилися рівними одиниці.

Таким чином, аналіз проведених розрахунків показує, що застосування системи векторного керування з робастним регулятором в каналі потоку для регулювання ЕП у компресорних установках є доцільним.

#### Висновки

Розроблено методологію наукового дослідження перехідних процесів в асинхронному електроприводі V-подібної двоступінчастої поршневої повітряної компресорної установки з прямим кутом розвалу при векторному керуванні. Запропоновано структурну схему системи векторного керування з робастним регулятором у контурі потоку асинхронного електроприводу такої установки. Побудовано схему моделювання перехідних процесів в асинхронному електроприводі компресорної установки з урахуванням дії сил тертя, періодичних газових сил і сил тяжіння поступово рухомих мас КШМ в пакеті Simulink. Результати аналізу проведених розрахунків перехідних процесів в електроприводі суднового V-подібного компресора показують, що при векторному керуванні з робастним регулятором в каналі потоку забезпечується стабілізація електромагнітного моменту та кутової швидкості жорсткої системи, що складається з ротора асинхронного двигуна і колінчастого валу КШМ, у межах допусків при високій точності регулювання поточкозчеплення робастним регулятором.

#### Список літератури:

1. Столярчук В.Ф., Рачинец Н.Ф., Гладько Б.М. Исследование движения и динамики машин, оборудованных электроприводом. Львов : изд-во Львовского ун-та, 1972. 171 с.
2. Wachel J.C., Tison J.D. Vibration in reciprocating machinery and piping systems. *Proceedings of the twenty-third turbo machinery symposium*. Texas : Texas A&M University, 1994. P. 243–272. DOI: <https://doi.org/10.21423/R1808S>.
3. Morillo A.H.V., Kurka P.R.G., Bittencourt M. L. Dynamics analysis of reciprocating compressor crankshafts. *Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics*. (21 August 2018) / eds K.L. Cavalca, H.I. Weber : Springer Nature Switzerland, 2019. Vol. 1. P. 489–501. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_34).
4. Хлопенко М.Я., Хлопенко І.М. Моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двохступінчастого поршневого компресора. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2022. Т. 33(72). № 3. С. 73–80. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/12>.
5. Хлопенко М.Я., Рожков С.О. Хлопенко І.М. Патент України на корисну модель № 137157. Система векторного керування швидкістю асинхронного електродвигуна. Заявл. 18.03.2019 ; опубл. 10.10.2019. Бюл. 19.
6. Chernyi S.G., Erofeev P., Novak B., Emelianov V. Investigation of the mechanical and electromechanical starting characteristics of an asynchronous electric drive of two-piston marine compressor. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. № 9, 207. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>.



7. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений. Москва : Академия, 2006. 304 с.
8. Хлопенко Н.Я., Хлопенко И.Н. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 1. С. 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X/2017.1.04.
9. Khlopenko I.N., N.J. Khlopenko, Rozhkov S.A. Analysis and verification of operation of the stabilizing robust controller's electrical circuit of the rotor flux-linkage control system. *Electrical engineering & electromechanics*. 2020. № 6. С. 18–23. DOI: 10.20998/2074-272X/2020.6.03.
10. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Теория и расчет. Изд. 3-е, доп. Москва : КолосС, 2006. Т. 1. 456 с.
11. Кириллов Р.С. Моделирование векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора : учебное пособие по курсовому проектированию. Екатеринбург : Уральский государственный горный ун-т, 2010. 30 с.

**Khlopenko I.M. CALCULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A MARINE TWO-STAGE RECIPROCATING COMPRESSOR UNDER VECTOR CONTROL WITH A ROBUST CONTROLLER IN THE FLUX-LINKAGE CHANNEL**

*The aim of the work is the calculation of transient processes in the asynchronous electric drive of the marine V-type two-stage reciprocating compressor with a right angle camber under vector control with a robust controller in the flux-linkage channel. To conduct research, a methodology for the scientific study of transient processes in an asynchronous electric drive of a reciprocating air compressor unit under vector control has been developed. A block diagram of a vector control system with a robust controller in the flux-linkage loop of an asynchronous electric drive of such an unit is proposed. Based on the previously created mathematical model, the transfer function of the  $H_\infty$ -suboptimal robust controller was calculated using the mixed sensitivity method. The static moment of the friction forces acting on the electric motor was determined according to the indicator diagrams and the specified mechanical efficiency ratio. Formulas for the moments of the acting air pressure reduced to the crank on the compressor pistons are given. The expansion of these moments by harmonics to Fourier series up to and including the fifteenth order was carried out in the MathCAD package. Graphical dependences of moments of air pressure resultant forces on compressor pistons reduced to the crank on the angle of rotation of the rigid shaft, calculated by partial sums of Fourier series and without their expansion into Fourier series, are constructed. A good match was obtained between the results of the calculation according to both formulas, except for a few points, with the given number of members of the series equal to fifteen. A scheme for transient processes modeling in an asynchronous electric drive of a compressor unit was built in the Simulink package, taking into account reduced to the crank torques of the acting frictional forces, periodic gas forces and gravity forces of translationally moving masses of the crank mechanism. Moments of the specified gravity forces were determined by the formulas proposed earlier. On a specific example, transient processes in the electric drive of a marine V-type compressor unit with a rigid shaft, consisting of a rotor of an asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor, a compressor crankshaft and a flywheel, are investigated. It is shown that the ranges of steady parametric oscillations of the rigid shaft angular velocity are within tolerances with high-precision stabilization of the flux-linkage by a robust controller, a change in the sign of a cyclically repetitive load and oscillations of the electromagnetic torque in the working area of the electric machine. References 11, figures 4.*

**Key words:** two-stage reciprocating compressor; asynchronous electric motor; vector control system, robust controller in the flow circuit, transient processes.

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.577+697.1

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/21>

**Безродний М.К.**

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

**Притула Н.О.**

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

**Мішко П.І.**

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

### ОПТИМАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМІННИКА ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ ПРИРОДНОЇ ВОДИ І ГРУНТУ В ТЕПЛОНАСОСНИХ СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ

*Проаналізовано існуючий стан та перспективи впровадження теплових насосів. Показано недоліки встановлення ґрунтових та водяних теплових насосів. Показано, що вказані недоліки можуть бути усунені за рахунок одночасного використання теплоти ґрунту та природної води як нижнього джерела теплоти для теплонасосної установки. Описано принципову теплонасосну схему низькотемпературного водяного опалення з використанням теплоти природної води та ґрунту та розглянуто принцип її роботи. Побудовано математичну модель для визначення оптимальних характеристик теплообмінника у формі бухти, в якій враховано ефективність роботи теплового насоса. На основі термодинамічного аналізу принципової теплонасосної схеми з урахуванням оптимального ступеня охолодження етиленгліколю у випарнику теплового насоса за рахунок чого забезпечуються мінімальні енергетичні затрати на теплонасосну систему, отримано оптимальне співвідношення між характеристиками теплообмінника, а саме довжина труби, діаметр труби та швидкість руху теплоносія. Отримані оптимальні характеристики теплообмінника залежать в основному від різниці температур води у колодязі та середньої температури етиленгліколю, що циркулює всередині труби, яка впливає на питомий тепловий потік, підведений до теплообмінника, слабо залежать від теплофізичних характеристик теплоносія і практично не залежать від температурних умов роботи теплонасосної системи. Наведені співвідношення можуть бути використані на стадії проектування теплонасосної системи низькотемпературного водяного опалення з використанням теплоти природної води та ґрунту при визначенні оптимальної довжини труби бухти, а також перепаду тиску в контурі для підбору циркуляційного насоса, або витрати теплоносія зі сторони нижнього джерела теплоти для забезпечення оптимальних умов роботи теплонасосної системи тепlopостачання.*

**Ключові слова:** тепловий насос, система опалення, теплообмінник, теплота природно води, теплота ґрунту.

#### Постановка проблеми

На сьогоднішній день в Україні гостро постали проблеми раціонального використання природних енергоресурсів та охорони довкілля. Ці питання можуть бути вирішені за рахунок впровадження сучасної техніки генерації теплоти – теплових насосів (ТН). Їхнє використання дозволить: знизити витрати енергії на тепlopостачання; витіснити з енергетичного балансу країни значну кількість

природного газу; забезпечити екологічну чистоту тепlopостачання; досягти зниження обсягів викидів шкідливих та парникових газів [1].

Базуючись на вищеперерахованих можливостях, найбільш очікуваною зміною в структурі теплового балансу України є активний розвиток теплових насосів, оскільки їх використання забезпечує, окрім економічного, значний енергозберігаючий та екологічний ефект.

З метою зменшення залежності України від імпортованих енергоносіїв потрібно впровадити енергоефективні технології та забезпечити ширше застосування нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії.

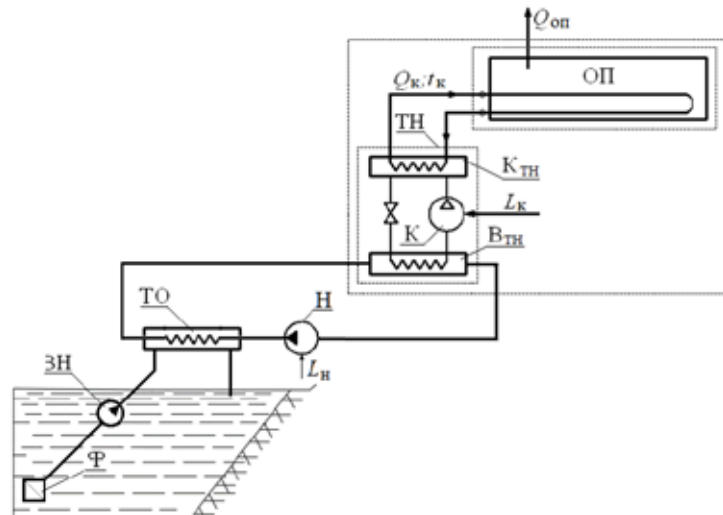
**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Нині теплові насоси вважаються найбільш перспективними серед джерел нетрадиційної енергетики, для вирішення проблем енергозбереження, завдяки можливості використовувати відновлювану енергію довкілля. Універсальним джерелом теплоти для ТП є теплота ґрунту, оскільки він акумулює сонячну енергію, що забезпечує порівняно рівномірну температуру джерела теплоти протягом року, і тим самим, високий коефіцієнт корисної дії роботи ТН [2–4].

Аналізуючи роботу ТН з використанням як джерела теплоти ґрунту, можна назвати такі його переваги та недоліки: високий коефіцієнт трансформації за рахунок постійної високої температури джерела теплоти; невисокі експлуатаційні затрати; простота обслуговування горизонтальних теплообмінників (ТО); для установки вертикальних геотермальних ТО необхідна невелика площа ділянки; високі початкові капіталоукладення на інсталяцію обладнання вертикальних свердловин (буріння свердловин, погодження цих робіт з відповідними організаціями); використання горизонтального ґрунтового ТО потребує значної площі для його розміщення, що в свою чергу виснажує великі поверхні ґрунту та, як наслідок, спричиняє загибель рослин [2–5].

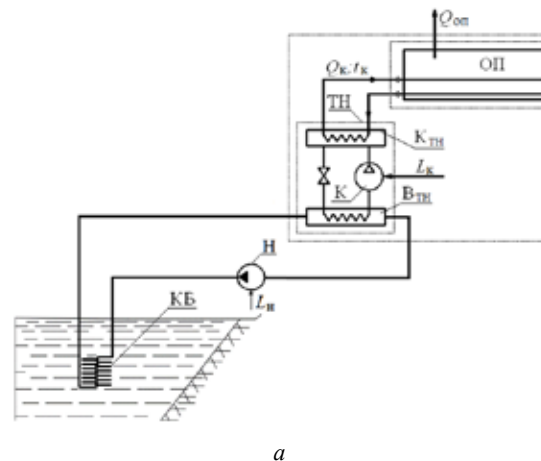
Значною перевагою користується вода, оскільки має високу теплоємність та інтенсивний теплообмін у випарнику. На рис. 1 представлено схему використання теплоти води відкритої водойми. Через випарник ТН циркуляційним насосом прокачується гліколь, що підігрівається в теплообміннику очищеної у фільтрі водою, що подається занурювальним насосом. У цій схемі використовується проміжний циркуляційний контур [6], що включає в себе окрім насоса теплообмінник для використання теплоти природної води і випарник ТН.

Можна уникнути встановлення проміжного контуру, якщо опустити у водойму бухту з поліетиленової труби і

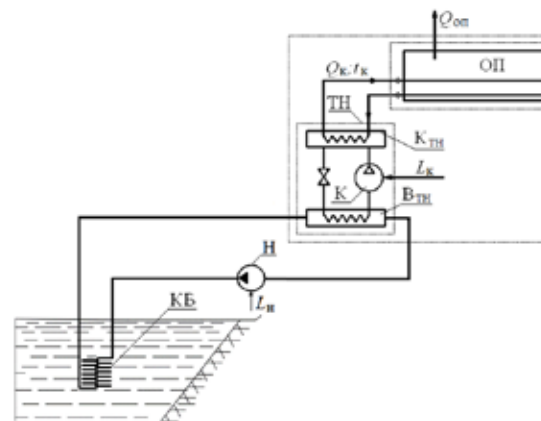


**Рис. 1. Схема використання теплоти відкритої водойми з проміжним циркуляційним контуром:**

ОП – опалювальне приміщення, ТН – тепловий насос, К<sub>тн</sub> – конденсатор ТН, В<sub>тн</sub> – випарник ТН, К – компресор, Н – насос, L<sub>к</sub> – робота приводу компресора ТН, L<sub>н</sub> – робота приводу насоса, ТО – теплообмінник, ЗН – занурений насос, Ф – фільтр.



а



б

**Рис. 2. Схема використання теплоти відкритої водойми з теплообмінником виконаним у вигляді:**

а) компактної бухти (КБ) з поліетиленової труби; б) розгорнутої бухти (РБ) з поліетиленової труби.

використовувати її поверхню як теплопередавальну в контурі циркуляції гліколю через випарник. При цьому бухта може бути компактною, як показано на рис. 2а, або розгорнутою рис. 2б.

Аналізуючи роботу ТН з використанням природної води як джерела теплоти, можна назвати наступні переваги та недоліки: можливість розміщення на невеликій ділянці; достатній коефіцієнт трансформації; високі капіталовкладення; великі затрати на обслуговування системи фільтрів для води, яка потрапляє до випарника ТН; додаткова витрата енергії за рахунок використання зануреного насоса [1; 5; 6].

### Постановка завдання

В наведеному огляді зазначенні недоліки використання як природної води, так і ґрунту як нижнього джерела теплоти для ТН. Поєднання цих джерел теплоти в одній теплонасосній установці дозволить усунути ці недоліки і отримати кращі показники роботи. Таким чином, при будівництві будинків поблизу відкритих водойм з'являється технічна можливість використання теплоти цих водойм як джерела низькопотенційної теплоти з його перетворенням в ТН. Доцільність такого використання повинна оцінюватися з урахуванням фізичних характеристик теплообмінних пристроїв, що застосовуються.

### Виклад основного матеріалу досліджень

На рис. 3 зображена принципова теплонасосна схема низькотемпературного водяного опалення з використанням теплоти природної води

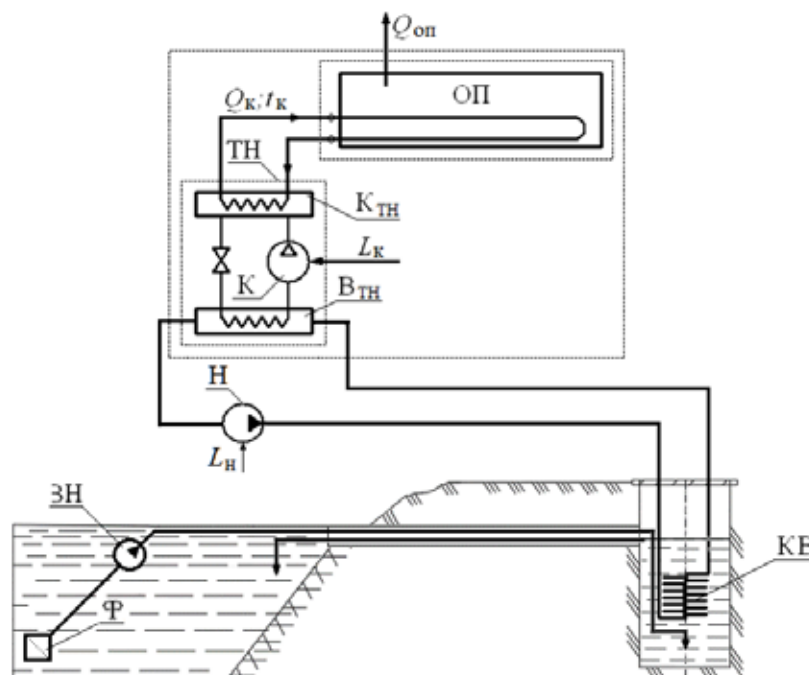


Рис. 3. Принципова теплонасосна схема низькотемпературного водяного опалення з використанням теплоти природної води та ґрунту

та ґрунту. В наведеному аналізі розглядаються теплообмінник у вигляді бухти. По трубах теплообмінника рухається незамерзаючий теплоносіє (етиленгліколь чи пропіленгліколь), який нагрівається за рахунок теплоти ґрунту та води, а потім віддає теплоту водяній системі теплопостачання будинку. Вода із водойми подається зануреним насосом в колодязь, де розташований теплообмінник і скидається назад у водойму. Теплота води, що попередньо підігрілася за рахунок проходження в ґрунті, відбирається за допомогою опущеної в колодязь з цією водою бухти із поліетиленової труби. В проміжному контурі, заповненому етиленгліколем, теплота передається від теплообмінника до випарника теплового насоса.

Водний розчин етиленгліколю з температурою  $t_T^{BX}$  й об'ємною витратою  $V_T$  насосом подається у випарник ТН, де він охолоджується та на виході його температура становить  $t_T^{BHX}$ . В роботі [5] встановлено, що існує оптимальний ступінь охолодження теплоносія у випарнику ТН. Це проявляється внаслідок того, що затрати енергії на привід компресора ТН та на насос при зміні температури теплоносія на виході з випарника ТН змінюються в протилежних напрямках. Таким чином, підтримання оптимального ступеня охолодження теплоносія в випарнику ТН забезпечує мінімальні сумарні затрати зовнішньої енергії на ТНС опалення в цілому.

Опалювальне приміщення має теплові втрати в навколишнє середовище  $Q_{оп}$ . Для їхньої компенсації використовується тепловий потік від конденсатора ТН  $Q_k$  з температурою теплоносія  $t_k$  на вході в систему опалення.

### Розрахункові формули

Рівняння теплового балансу теплообмінника у формі бухти, що занурений в колодязь з водою, яка попередньо підігріта за рахунок проходження в ґрунті, можна представити у вигляді

$$Q_{підв} = Q_{відв} \quad (1)$$

Без урахування нестационарності процесу підведений тепловий потік до теплообмінника визначається за співвідношенням

$$Q_{підв} = q_{ТО} L_{ТО} \quad (2)$$

де  $q_{ТО}$  – питомий тепловий потік, віднесений до 1 м труби теплообмінника, зануреного у колодязь, Вт/м;  $L_{ТО}$  – довжина труби ТО у формі компактної бухти, м.

З іншого боку в літературі [1, 6] наводяться дані щодо питомої довжини труби теплообмінника, віднесеної до 1 кВт теплового потоку від води в водоймі до етиленгліколю. Формула для визначення цієї величини має вигляд

$$L_{\text{ТО}} = C \Delta t^m, \quad (3)$$

де  $L_{\text{ТО}}$  – довжина поліетиленового трубопроводу, віднесена до 1 кВт теплового потоку від води до циркулюючого по трубі етиленгліколю, м;  $\Delta t$  – різниця температури води у колодязі та середньої температури етиленгліколю, що циркулює всередині труби, °С;  $C$  і  $m$  – коефіцієнт та показник степені, значення яких можна визначити з табл. 1.

Залежність (3) достовірна, якщо потік рідини в трубках не є ламінарним і  $Re > 3000$  [1; 6].

Тоді, аналогічно формулі (2) можна записати

$$1000 = q_{\text{ТО}} L_{\text{ТО}}, \quad (4)$$

звідки можна отримати значення питомого теплового потоку  $q_{\text{ТО}}$  в такому теплообміннику для подальшого аналізу задачі, що розглядається

$$q_{\text{ТО}} = \frac{1000}{C \Delta t^m}. \quad (5)$$

Тоді, підведений тепловий потік до ТО може бути визначений з рівняння

$$Q_{\text{підв}} = \frac{1000}{C \Delta t^m} L_{\text{ТО}}, \quad (6)$$

де  $\Delta t = t_{\text{в}} - (t_{\text{вн}}^{\text{вх}} - \Delta t_{\text{вн}}^{\text{опт}} / 2)$  – температурний напір в теплообміннику.

Підведений до теплообмінника тепловий потік дорівнює тепловому потоку, що відводиться у випарнику. Нехтуючи впливом дисипації енергії при подоланні потоком етиленгліколю гідравлічного опору випарника, величину  $Q_{\text{вип}}$  можна визначити за формулою:

$$Q_{\text{відв}} = Q_{\text{вип}} = w \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} \rho_{\text{т}} c_{\text{р}} \Delta t_{\text{вип}}, \quad (7)$$

де  $w$  – швидкість етиленгліколю в теплообміннику, м/с;  $d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр труби бухти, м;  $\rho_{\text{т}}$  – густина етиленгліколю, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{р}}$  – ізобарна теплоємність етиленгліколю, КДж/кг К;  $\Delta t_{\text{вип}}$  – різниця температур етиленгліколю на вході та виході з випарника, °С.

Аналіз, проведений в [5], показав, що оптимальний ступінь охолодження етиленгліколю у випарнику теплового насоса, який забезпечує мінімум затрат електроенергії на ТНС теплопостачання, зростає зі збільшенням загальних втрат тиску в нижньому контурі та слабо залежить від розрахункової температури теплоносія на опалення в діапазоні температур 30–50 °С, температури навколишнього середовища та температури етиленгліколю на вході до випарника ТН.

Вираз для оптимального ступеня охолодження етиленгліколю у випарнику теплового насоса, який визначено в роботі [5], має вигляд

$$\Delta t_{\text{вип}}^{\text{опт}} = \sqrt{\frac{A(273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}})}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{пр}}}} \left[ \eta_{\text{ТН}} - 1 + \frac{273 + t_{\text{т}}^{\text{вх}} - \Delta t_{\text{в}}}{273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}}} \right], \quad (8)$$

де  $\eta_{\text{н}}$ ,  $\eta_{\text{пр}}$  – ККД насоса та його приводу відповідно. Можна прийняти, що в оптимальному режимі роботи насоса  $\eta_{\text{н}} = 0,8$ , а ККД приводу  $\eta_{\text{пр}} = 0,95$  [1];  $\eta_{\text{ТН}}$  – коефіцієнт, що враховує реальні процеси, здійснювані робочим тілом в ТН, який згідно з [1] можна прийняти 0,6;  $\Delta t_{\text{в}}$  – різниця температур етиленгліколю та робочого тіла ТН на виході з випарника, °С;  $\Delta t_{\text{к}}$  – різниця температур робочого тіла ТН та води на виході з конденсатора, °С. У наведеному аналізі згідно [1] прийнято  $\Delta t_{\text{в}} = 5$  °С і  $\Delta t_{\text{к}} = 5$  °С;  $t_{\text{т}}^{\text{вх}}$  – температура етиленгліколю на вході до випарника теплового насоса, °С.

Температура води на виході з конденсатора  $t_{\text{к}}$  дорівнює температурі гріючого теплоносія на вході в систему опалення. Для визначення цієї температури має силу рівняння, яке виводиться на основі аналізу процесів теплообміну в системі гріюча вода – повітря в приміщенні – атмосферне повітря [5]

$$t_{\text{к}} = t_{\text{п}} + (t_{\text{т}}^{\text{р}} - t_{\text{п}}) \left( \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{о}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{о}}^{\text{р}}} \right)^{\frac{1}{1+n}}, \quad (9)$$

де  $t_{\text{т}}^{\text{р}}$  – розрахункова температура гріючого теплоносія при розрахунковій температурі навколишнього середовища  $t_{\text{о}}^{\text{р}}$ ;  $n = 0$  для низькотемпературних системи опалення.

Таблиця 1

Значення величин  $C$  і  $m$

$D_{\text{н}}$ , мм	$C$				$m$			
	Бухта розгорнута		Бухта компактна		Бухта розгорнута		Бухта компактна	
	Літо	Зима	Літо	Зима	Літо	Зима	Літо	Зима
33	82	51	98	63	-0,78	-0,72	-0,75	-0,71
42	56	46	65	56	-0,64	-0,72	-0,79	-0,70
48	69	48	83	61	-0,72	-0,72	-0,70	-0,73

Комплекс постійних величин в формулі (8)

$$A = \frac{\Delta p}{\rho_t c_p} \quad (10)$$

Сумарні втрати тиску в нижньому контурі (у випарнику теплового насоса та теплообміннику у формі бухти)

$$\Delta p = \Delta p_{\text{вип}} + \Delta p_{\text{ТО}}, \quad (11)$$

де  $\Delta p_{\text{ТО}}$  – втрати тиску при подоланні потоком етиленгліколю гідравлічного опору теплообмінника, що визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{ТО}} = \lambda \frac{\rho_t w^2 L_{\text{ТО}}}{2 d_{\text{вн}}} \quad (12)$$

Для подальших розрахунків прийнято, що коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  визначається в залежності від режиму течії етиленгліколю:

– при ламінарному режимі течії в гладких трубах  $Re < 2300$  коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  визначається згідно з законом Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (13)$$

– при турбулентному режимі течії  $Re < 2300$  коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  для гладких труб визначається за рівнянням Блазіуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (14)$$

де  $Re = wd_{\text{вн}}/\nu_t$ , а  $\nu_t$  – кінематична в'язкість етиленгліколю,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Якщо у співвідношення (1) підставити формули (2), (7), (8), то отримаємо квадратне рівняння відносно невідомої довжини труби у бухті теплообмінника  $L_{\text{ТО}}$  при заданих умовах його застосування

$$aL_{\text{ТО}}^2 - \epsilon L_{\text{ТО}} - c = 0. \quad (15)$$

Рішення рівняння (15) дозволяє отримати вираз для оптимальної довжини труби контуру ТО, якому відповідає додатній корінь квадратного рівняння

$$L_{\text{ТО}}^{\text{опт}} = \frac{\epsilon + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a}, \quad (16)$$

де коефіцієнти квадратного рівняння:

$$a = \left( \frac{4q_{\text{г}}}{\pi \rho_t d_{\text{вн}}^2 c_p} \right)^2; \quad \epsilon = \frac{\lambda w^2 B}{2c_p d_{\text{вн}}}; \quad c = \frac{\Delta p_{\text{вип}} B}{\rho_t c_p}, \quad (17)$$

а комплекс  $B$  виражений з співвідношення (8) і має вигляд

$$B = \frac{(273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}})}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{пр}}} \left[ \eta_{\text{ТН}} - 1 + \frac{273 + t_{\text{т}}^{\text{вх}} - \Delta t_{\text{вип}}}{273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}}} \right]. \quad (18)$$

Розрахунковий аналіз оптимальних характеристик теплообмінника нижнього контуру для використання теплоти природної води і ґрунту.

Отримана формула (16) являє собою оптимальне співвідношення між такими параметрами теплообмінника, як довжина труби бухти, діаметр труби і швидкість руху теплоносія при заданих умовах застосування бухти, визначеному підведеному тепловому потоку до ТО  $Q_{\text{підв}}$ , теплофізичних властивостей вибраного теплоносія, а також температурних умов роботи теплонасосної установки.

Як теплоносієм для відбору теплоти від ґрунту найбільш часто використовують водяні розчини етиленгліколю або пропіленгліколю. Розчин на основі етиленгліколю має меншу в'язкість і тому практично виключає ламінарний режим в умовах руху теплоносія в реальних теплообмінниках. В роботі [1; 6] зазначено, що при виключенні ламінарного режиму руху теплоносія інтенсивність тепловідбору від ґрунту практично не залежить від діаметра труби.

За вищезазначених умов роботи теплообмінника за формулою (16) було проведено розрахунки оптимального співвідношення між довжиною труби бухти  $L_{\text{ТО}}$ , швидкістю руху теплоносія  $w$  та внутрішнім діаметром труби  $d_{\text{вн}}$ . Результати розрахунків наведені в табл. 2. Розрахунки проведено для таких вхідних даних:

- 25% водяний розчин етиленгліколю;
- температура розчину етиленгліколю на вході до випарника  $t_{\text{т}}^{\text{вх}} = 3^\circ\text{C}$ ;
- теплофізичні властивості розчин етиленгліколю: густина  $\rho_t = 1044,636 \text{ кг/м}^3$ ; ізобарна теплоємність  $c_p = 3765 \text{ Дж/кг К}$ ; кінематична в'язкість  $\nu_t = 3,308 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [5];
- температура навколишнього повітря  $t_{\text{о}} = -20^\circ\text{C}$ ;
- розрахункова температура ґріючого теплоносія  $t_{\text{т}}^{\text{р}} = 45^\circ\text{C}$ ;
- розрахункова температура на опалення  $t_{\text{п}}^{\text{о}} = -20^\circ\text{C}$ ;
- втрати тиску у випарнику теплового насоса  $\Delta p_{\text{вип}} = 35 \text{ КПа}$  [5].

Для зручності практичного використання отриманих даних в табл. 2 наведені також загальні теплові потоки, що відводяться одним контуром бухти теплообмінника від нижнього джерела і які можуть бути використані при проектуванні системи теплонасосного опалення будинку з заданими втратами теплоти на опалення.

Результати розрахунків оптимальних параметрів ТО

Діаметр Труби $D_3$ , мм	Різниця температур $\Delta t$ , °C	Питомий тепловий потік, Вт/м	Характеристики теплообмінника	Швидкість $w$ , м/с				
				$w_1 = 0.7$	$w_2 = 0.8$	$w_3 = 0.9$	$w_4 = 1$	$w_5 = 1,1$
33	2	26	$L_{ТО}^{opt}$ , м	113	155	213	292	398
			$Q$ , кВт	2,938	4,03	5,538	7,592	10,348
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	44	76	128	211	339
	4	43	$L_{ТО}^{opt}$ , м	58	74	96	125	163
			$Q$ , кВт	2,494	3,182	4,128	5,375	7,009
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	22	36	57	90	139
	6	57	$L_{ТО}^{opt}$ , м	41	51	64	81	102
			$Q$ , кВт	2,337	2,907	3,648	4,617	5,814
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	16	25	38	58	87
42	2	29	$L_{ТО}^{opt}$ , м	166	228	316	437	598
			$Q$ , кВт	4,814	6,612	9,164	12,673	17,342
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	48	83	142	236	382
	4	47	$L_{ТО}^{opt}$ , м	86	111	145	191	251
			$Q$ , кВт	4,042	5,217	6,815	8,977	11,797
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	25	41	65	103	160
	6	63	$L_{ТО}^{opt}$ , м	59	75	94	120	153
			$Q$ , кВт	3,717	4,725	5,922	7,56	9,639
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	17	27	42	65	98
48	2	27	$L_{ТО}^{opt}$ , м	254	359	508	713	985
			$Q$ , кВт	6,858	9,693	13,716	19,251	26,595
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	62	111	192	324	530
	4	45	$L_{ТО}^{opt}$ , м	123	163	216	288	384
			$Q$ , кВт	5,535	7,335	9,72	12,96	17,28
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	30	50	82	131	207
	6	61	$L_{ТО}^{opt}$ , м	83	106	136	175	227
			$Q$ , кВт	5,063	6,466	8,296	10,675	13,847
			$\Delta p_{ТО}$ , кПа	20	33	52	80	122

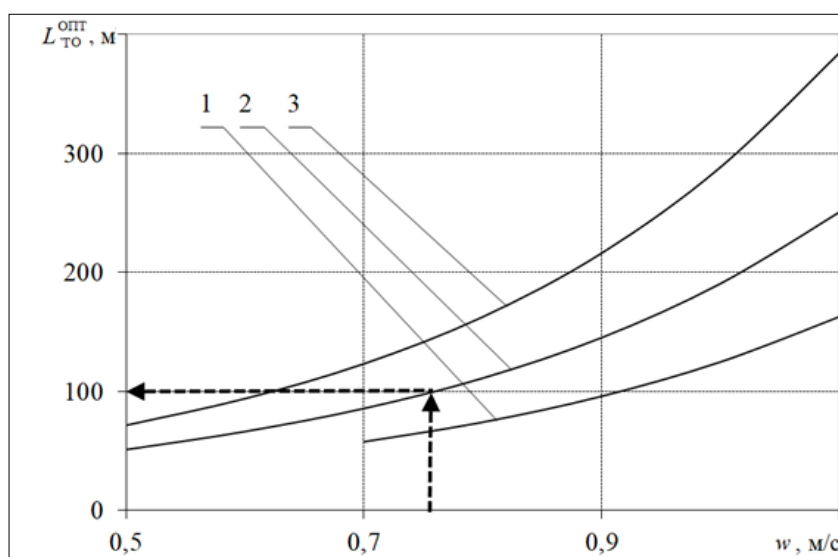


Рис. 4. Залежність довжини бухти теплообмінника від швидкості руху водяного розчину етиленгліколю при різниці температур води у колодязі і середній температурі етиленгліколю, що циркулює всередині поліетиленової труби, рівній  $\Delta t = 4$  °C: 1 –  $d_3 = 33$  мм; 2 –  $d_3 = 42$  мм; 3 –  $d_3 = 48$  мм

На рис. 4 і 5 наведена графічна інтерпретація отриманих оптимальних характеристик бухти теплообмінника при різниці температур води у колодязі і середній температурі етиленгліколю, що циркулює всередині поліетиленової труби, рівній  $\Delta t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ . З рис. 4 оптимальна довжина поліетиленової труби в бухті контуру теплообмінника може бути визначена в залежності від вибраного значення швидкості руху теплоносія та діаметра труби.

При визначених, таким чином, величинах довжини труби бухти ТО ( $L_{\text{ТО}}^{\text{опт}}$ ) і прийнятому діаметрі поліетиленової труби в бухті ( $d_3$ ) рис. 5 дозволяє визначити відповідний перепад тиску  $\Delta p_{\text{ТО}}$  в бухті теплообмінника, після чого може бути визначено загальний перепад тиску в контурі нижнього джерела теплоти для підбору циркуляційного насоса.

Навпаки, якщо вхідною величиною при проектуванні бухти, поміщеної в колодязь, є тиск циркуляційного насоса, то з урахуванням співвідношення (11) за допомогою графіків на рис. 5 можна визначити оптимальне співвідношення довжини і діаметра труби і потім з рис. 4 знайти відповідне значення швидкості руху теплоносія, що має бути враховане при визначенні необхідної витрати теплоносія через теплообмінник в залежності від теплової потужності ТН для даного об'єкту тепlopостачання. На основі отриманих параметрів для однієї бухти може бути визначена необхідна кількість бухт, паралельно підключених в залежності від теплової потужності ТН для даного об'єкту тепlopостачання.

### Висновки

1. На основі термодинамічного аналізу принципової теплонасосної схеми низькотемпературного

водяного опалення з використанням теплоти природної води та ґрунту з урахуванням оптимального ступеня охолодження теплоносія у випарнику теплового насоса для забезпечення мінімальних енергетичних затрат на теплонасосну систему отримано оптимальне співвідношення між характеристиками теплообмінника у формі бухти, а саме довжина труби, діаметр труби, швидкість руху теплоносія при заданих умовах його застосування (різниці температур води у колодязі та середньої температури етиленгліколю, що циркулює всередині труби, теплофізичні характеристики теплоносія, температурні умови роботи теплонасосної системи).

2. Отримані оптимальні характеристики теплообмінника у формі бухти залежать в основному від різниці температур води у колодязі та середньої температури етиленгліколю, що циркулює всередині труби, яка впливає на питомий тепловий потік, відведений до теплообмінника, слабо залежать від теплофізичних характеристик теплоносія і практично не залежать від температурних умов роботи теплонасосної системи.

3. Наведені співвідношення можуть бути використані на стадії проектування колектору у формі бухти при визначенні оптимальної довжини труби бухти, а також перепаду тиску в контурі для підбору циркуляційного насоса, або витрати теплоносія зі сторони нижнього джерела теплоти для забезпечення оптимальних умов роботи теплонасосної системи тепlopостачання з використанням теплоти природної води та ґрунту.

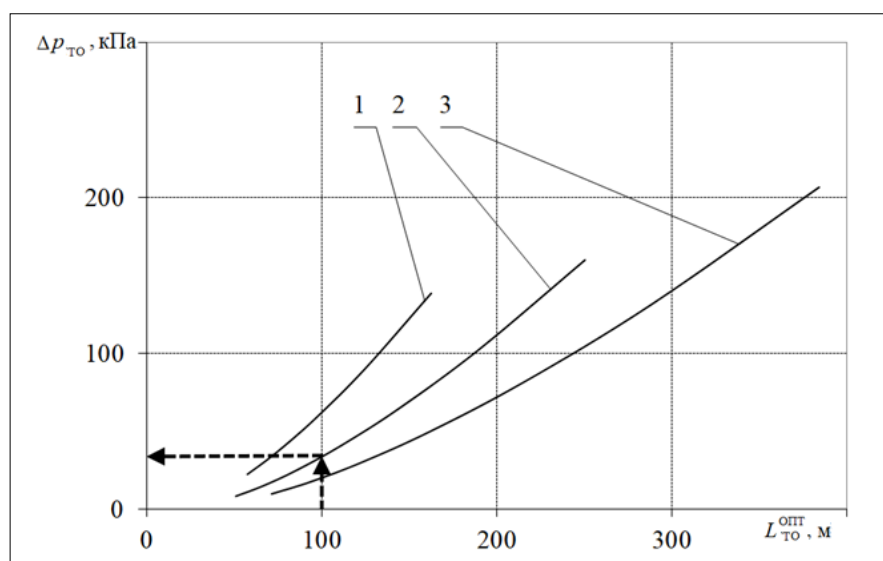


Рис. 5. Залежність втрат тиску у теплообміннику від довжини труби при різниці температур води у колодязі і середній температурі етиленгліколю, що циркулює всередині поліетиленової труби, рівній  $\Delta t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ : 1 –  $d_3 = 33 \text{ мм}$ ; 2 –  $d_3 = 42 \text{ мм}$ ; 3 –  $d_3 = 48 \text{ мм}$



## Список літератури:

1. Безродний М. К. Теплові насоси та їх використання [Текст] : навч. посіб. / М. К. Безродний, І. І. Пуховий, Д. С. Кутра. К. : НТУУ «КПІ», 2013. 312 с.
2. Mohammadreza Pishkariahmadabad, Hamdi Ayed, Wei-Feng Xia, Yashar Aryanfar, Abdulaziz M. Almutlaq, Belgacem Bouallegue Thermo-economic analysis of working fluids for a ground source heat pump for domestic uses / Case Studies in Thermal Engineering, Volume 27, October 2021, 101–330.
3. Hongzhi Zhang, Zongwei Han, Lingyan Yang, Jiawei Yuan, Xinlu Cheng, Mingzhen Ji, Gui Li Analysis of influence of the length of ground heat exchangers on the operation characteristics and economy of ground source heat pumps / Energy and Built Environment, Volume 2, Issue 2, April 2021, Pages 127–136
4. Barbara Larwa, Krzysztof Kupiec Heat transfer in the ground with a horizontal heat exchanger installed – Long-term thermal effects / Applied Thermal Engineering, Volume 164, 5 January 2020, 114–539
5. Безродний М.К Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія / М. К. Безродний, Н. О. Притула. К. : НТУУ «КПІ», 2016. 272 с.
6. Гершкович В.Ф. Особенности проектирования систем теплоснабжения зданий с тепловыми насосами / В.Ф. Гершкович. К. : Украинская Академия Архитектуры ЧП «Энергоминимум», 2009. 60 с.

**Bezrodny M.K., Prytula N.O., Mishko P.I. OPTIMAL CHARACTERISTICS OF A HEAT EXCHANGER FOR THE USE OF HEAT OF NATURAL WATER AND SOIL IN HEAT PUMP HEATING SYSTEMS**

*The current state and prospects of introduction of heat pumps are analyzed. The disadvantages of installing ground and water heat pumps are shown. It is shown that these shortcomings can be eliminated by the simultaneous use of soil heat and natural water as the lower source of heat for the heat pump installation. The basic heat pump scheme of low-temperature water heating using the heat of natural water and soil is described and the principle of operation is considered. A mathematical model for determining the optimal characteristics of the heat exchanger in the form of a bay, which takes into account the efficiency of the heat pump. Based on the thermodynamic analysis of the basic heat pump scheme taking into account the optimal degree of cooling of ethylene glycol in the heat pump evaporator due to which the minimum energy costs for the heat pump system are obtained, the optimal ratio between the characteristics of the bay heat exchanger is obtained. The obtained optimal characteristics of the heat exchanger depend mainly on the difference between water temperatures in the well and the average temperature of ethylene glycol circulating inside the pipe, which affects the specific heat flow to the heat exchanger, weakly depend on. These relations can be used at the stage of designing a heat pump system for low-temperature water heating using the heat of natural water and soil in determining the optimal length of the bay pipe, as well as the pressure drop in the circuit to select a circulating pump, or operation of the heat pump system of heat supply.*

**Key words:** heat pump, heating system, heat exchanger, heat of natural water, heat of soil.

**Босий М.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА НА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТОМУ РОБОЧОМУ ТІЛІ ПРОПАНИ

У статті розглядається проблема використання теплового насоса (ТН), що працює на альтернативних джерелах енергії для опалення та гарячого водопостачання будівель. У своїй роботі ТН використовує низькопотенційну теплоту повітря. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ТН, оцінені особливості роботи повітряного ТН для кліматичних умов України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи наведено схему утилізації низькопотенційної теплоти з використанням повітря. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря як теплоносія, є те, що повітряні ТН можуть працювати практично повсюди і не вимагають облаштування низькотемпературного контуру. Перспективним способом підвищення ефективності ТН при річному циклі його роботи є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря. Теплонасосна система з двома джерелами енергії забезпечує високу теплопродуктивність ТН протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними рішеннями. ТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел, знижують витрати на електропостачання більш, ніж в половину – це повністю автоматизований пристрій. Тому використання ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що нині в сучасних економічних умовах системи теплопостачання можуть розвиватися в напрямку застосування парокомпресійних повітряних ТН, при використанні зовнішнього повітря і повітря витяжної вентиляції промислових підприємств для підвищення теплотехнічних характеристик будівель. Модернізація із застосуванням даних заходів може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання. Енергетична ефективність ТН «повітря-вода» за коефіцієнтом перетворення COP ТН дорівнює 3,6. Ексергетичний ККД, який характеризує досконалість перетворення енергії в ТН «повітря-вода», становить 35 %.

**Ключові слова:** тепловий насос, термодинамічний цикл, низькопотенційне джерело теплоти, системи теплопостачання, коефіцієнт трансформації теплоти, ексергетичний ККД.

**Постановка проблеми.** Нині використання традиційних джерел енергії для теплопостачання потребує відповідних затрат зі скороченням запасів усіх видів органічного палива та зростання цін на енергоносії. Натепер необхідно впроваджувати екологічно чисті технології з використанням поновлюваних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля – це теплові насоси (ТН). Проблема зниження затрат на опалення приміщень та гаряче водопостачання тепер є актуальним питанням. Підвищення енергоефективності ТН, які використовують низькопотенційні джерела теплоти, в наш час також є одним із найважливіших актуальних питань для подальшого розвитку і впровадження екологічно чистих технологій і застосування відновлювальних джерел енергії в системах теплопостачання [1–7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ТН сприяють зменшенню використання органічного палива шляхом заміщення первинної енергії відновлювальними джерелами енергії. Це один із перспективних напрямків розвитку сучасної енергетики, який знаходиться в центрі уваги зарубіжних і українських дослідників. В країнах Європи та Америки ТН використовуються більше 30 років для теплопостачання житлових, офісних будівель, а також для різних приміщень [2; 4]. Найбільші енергетичні компанії займаються проектуванням, виготовленням і впровадженням ТН. Міжнародне Енергетичне Агентство (МЕА, латинська аббревіатура IEA), в якому асоційованими членами входять 28 енергетично розвинених країн і, метою діяльності якого є забезпечення енергетичної безпеки і пошук шляхів покращення екологічної ситуації і є головним координатором політики впровадження ТН. Досвід зарубіжних

країн, таких як Швеція, Фінляндія, Німеччина і інших доводить доцільність застосування ТН в системах теплопостачання. При проектуванні та реконструкції сучасних систем теплопостачання необхідно враховувати можливість використання технології ТН. Застосування ТН в комплексі з традиційною стемою теплопостачання для систем опалення, кондиціонування і вентиляції великих об'єктів забезпечує повну автономність зон регулювання та істотну економію паливно-енергетичних ресурсів навіть при використанні традиційних джерел енергії.

ТН – пристрій для переносу теплової енергії від джерела низькопотенційної теплової енергії (з низькою температурою) до споживача (теплоносія) з більш високою температурою. Термодинамічний цикл теплового насоса аналогічний холодильній машині, але навпаки. У тепловому насосі конденсатор являється теплообмінним апаратом, що виділяє теплоту для споживача, а випарник – теплообмінним апаратом, що утилізує низькопотенційну теплоту: вторинні енергетичні ресурси і нетрадиційні поновлювані джерела енергії. Залежно від принципу роботи ТН поділяються на парокомпресійні, абсорбційні і термоелектричні. Парокомпресійні теплові насоси завжди приводяться в дію за допомогою механічної енергії (електроенергії), у той час, як абсорбційні ТН можуть також використовувати теплоту в якості джерела енергії (за допомогою електроенергії або палива). Найбільше розповсюдження отримали парокомпресійні ТН [5–11].

Парокомпресійний ТН дозволяє максимально економити первинні високопотенційні енергоресурси в порівнянні з котельними установками, ця економія може становити 60% і вище в залежності від коефіцієнта трансформації теплоти [5].

Таким чином, проведення досліджень з підвищення енерго-ефективності використання парокомпресійного ТН в системах теплопостачання є актуальним.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у дослідженні енергетичної ефективності парокомпресійного повітряного ТН, робочим тілом якого є пропан.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Залежно від джерела відбору низькопотенційної теплоти ТН поділяють на: геотермальні ґрунтові (ґрунт–вода), водяні (вода–вода) та повітряні (повітря–вода), а також ТН, які використовують вторинну теплоту.

Принципова схема парокомпресійного ТН наведена на рис. 1.



Рис. 1. Принципова схема парокомпресійного ТН

Повітряні ТН використовують як джерело низькопотенційної теплової енергії повітря. Причому джерелом теплоти може бути не тільки зовнішнє (атмосферне) повітря, а й витяжне вентиляційне повітря (загальнообмінної або місцевої) вентиляції будівель. Даний агрегат не вимагає монтажу підземного чи підводного контуру. Як правило, установки даного типу використовуються в тому випадку, коли інші варіанти утилізації теплоти не можуть бути реалізовані. Теплова енергія повітря використовується до позначки  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Якщо будуть сильні морози, і температура повітря різко знижується, використовується і ще додатковий теплогенератор, але, наприклад, ТН Heloitem мають робочий діапазон температур від  $-25$  до  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  і додатковий теплогенератор їм не потрібний. Існують також повітряні ТН, які відбирають низькопотенційну теплоту з повітря і використовують її для обігріву приміщень в будинку за допомогою повітряної каналної системи (система «повітря–повітря»). Особливість даного типу повітряного ТН в тому, що вони працюють або в режимі нагріву, або в режимі охолодження. Повітряне опалення використовується в офісних будівлях, торгових центрах, промислових і складських приміщеннях.

Всі, навіть найефективніші ТН нагрівають воду в системі опалення не більше  $+62\dots+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , причому, чим вище температура води, що нагрівається, тим менша ефективність і надійність ТН. Якщо теплоти із зовнішнього контуру все ж недостатньо для опалення в дуже сильні морози, практикується експлуатація ТН в парі з додатковим генератором теплоти (в таких випадках це використання бівалентної схеми опалення). Коли вулична температура повітря опускається нижче розрахункового рівня (температури бівалент-

ності), в роботу включається другий генератор теплоти – найчастіше невеликий електронагрівач, рідше газовий, або твердопаливний котел. Оптимальна потужність теплоносною установкою становить 60–70% від необхідної встановленої потужності, що також впливає на закупівельну вартість установки опалення ТН. В цьому випадку ТН забезпечує не менше 95 % потреби споживача в тепловій енергії за весь опалювальний період. При такій схемі середньосезонний коефіцієнт перетворення енергії для кліматичних умов України дорівнює порядку  $COP = 3$  [8; 9].

Сучасним способом підвищення ефективності ТН при річному циклі його роботи є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря.

Наявні ресурси теплової енергії докільля багаторазово перевищують прогнозований рівень споживання всіма галузями промисловості України. На сьогоднішній день для вирішення проблем енергозбереження ТН є найбільш перспективним серед джерел нетрадиційної енергетики. Використання відновлювальних джерел енергії дає можливість обмежити використання традиційних палив, зменшити забруднення довкілля. Температурні рівні основних джерел теплоти: зовнішнє повітря  $+5...+10$  °С, витяжна вентиляція  $+15...+25$  °С. У процесі роботи ТН компресор споживає електроенергію. Співвідношення теплової енергії, що виробляється, і електричної, яка споживається, називається коефіцієнтом трансформації (або коефіцієнтом продуктивності (англ. COP – скор. від coefficient of performance) і є показником ефективності ТН. Для розрахунку COP використовується наступний вираз:

$$COP = Q/E, \quad (1)$$

де  $Q$  – теплота, отримана з системи, Дж;

$E$  – електроенергія, яка споживається, Дж;

Теплота отримана з системи розраховується за наступним виразом

$$Q = m \cdot C_v \cdot \Delta t, \quad (2)$$

$C_v = 4,19$  Дж/кг·К – питома масова теплоємність рідини в циклі опалення, Дж/кг·К;

$m = 1000$  кг – маса теплоносія, кг;

$\Delta t = 34$  °С – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії.

Електроенергія, яка споживається компресором теплового насоса розраховується за таким виразом

$$E = U \cdot I \cdot t, \quad (3)$$

де  $U = 0,380$  напруга, В;  $I = 120$  струм, А;  $t = 24$  час, год.

З рівняння (2) і (3) розраховуємо  $Q$  і  $E$ :

$$Q = 142460 \text{ кДж} = 39,57 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (4)$$

$$E = 10,94 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5)$$

Коефіцієнт трансформації COP ТН розраховуємо за рівнянням (1)

$$COP = 39,57 / 10,94 = 3,6 \quad (6)$$

Тобто, при температурі повітря  $10$  °С на кожний кіловат електричної енергії ми отримуємо  $3,6$  кВт теплової енергії.

Нами було досліджено ефективність ТН «повітря–вода» при різних значеннях температури зовнішнього джерела теплоти – повітря (рис. 2).

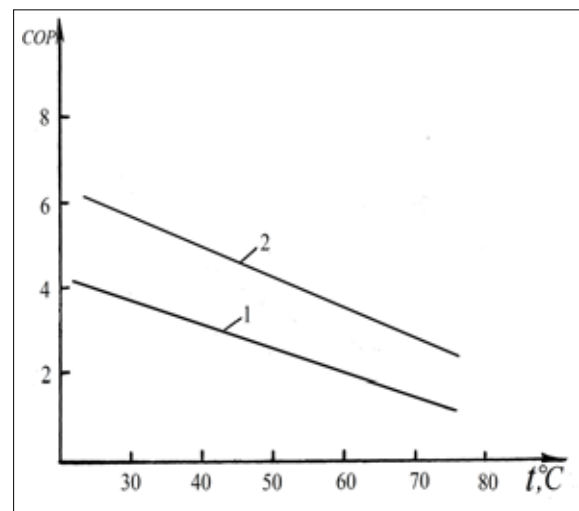


Рис. 2. Залежність коефіцієнта ефективності ТН (COP) від температури системи опалення: при температурі повітря: 1 – при  $5$  °С; 2 – при  $10$  °С

З рис. 2 видно, що коефіцієнт ефективності COP ТН «повітря–вода» залежить від зовнішньої температури джерела теплоти повітря і від характеру системи опалення. При збільшенні температури повітря з  $5$  до  $10$  °С коефіцієнт ефективності COP ТН збільшується у  $1,5$  рази. Вибір системи опалення навіть більше впливає на ефективність ТН, ніж температура повітря. При заміні традиційних систем опалення на низькотемпературні, ефективність ТН зростає. Тому, при проектуванні систем опалення з використанням ТН необхідно враховувати і цей фактор.

Аналіз енергоефективності парокомпресійного ТН «повітря–вода» проводився для робочого тіла холодоагента пропана (R290) [6]. Для R290 температура випаровування становить  $t_b = 4$  °С, а конденсації  $t_k = 7$  °С. Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти повітря, яке на вході у випарник має температуру  $t'_{\text{нт}} = 10$  °С, а на виході

Термодинамічний розрахунок парокompресійного ТН «повітря-вода»

Параметр	Розмірність	Розрахункові значення
Температура випаровування R290, $T_v$	К	277
Ентальпія R290 після випарника, $h_1$	кДж/кг	575
Тиск R290 у випарник, $P_v$	МПа	0,53
Температура конденсації R290, $T_k$	К	343
Ентальпія R290 після конденсатора, $h_3$	кДж/кг	208
Тиск конденсації R290, $P_k$	МПа	2,7
Ентальпія R290 на вході в компресор, $h_1$	кДж/кг	575
Ентальпія R290 після компресора, $h_2$	кДж/кг	675
Ентальпія R290 перед випарником, $h_4$	кДж/кг	208
Питоме теплове навантаження випарника, $q_v$	кДж/кг	367
Питоме теплове навантаження конденсатора, (теплого насоса), $q_k = (q_{тн})$	кДж/кг	467
Робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	100
Питома робота компресора, $l_{км}$	кДж/кг	117
Питома робота, яка витрачається на привід компресора, $l_{пр}$	кДж/кг	130
Перевірка теплового балансу	кДж/кг	467
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	–	3,6
Ексергетичний ККД ТН, $\eta_{ex}$	–	0,35

з нього  $t''_{нт} = 6$  °С. Температура мережевої води (теплоносія) на вході в конденсатор становить  $t'_{мв} = 34$  °С, а на виході з нього  $t''_{мв} = 58$  °С.

Розглянемо визначення показників енергоефективності парокompресійного циклу ТН «повітря-вода» для системи тепlopостачання за методиками, приведеними в [6; 10–14].

Результати проведеного термодинамічного розрахунку парокompресійного ТН «повітря-вода» наведені в табл. 1.

ТН характеризуються вищою ефективністю, ніж усі традиційні технології на ринку тепlopостачання. Для порівняння: газовий котел при споживанні 1 кВт електроенергії зможе виділити близько 0,9 кВт теплоти, тоді як ТН справляється з цим завданням, демонструючи віддачу в 3–5 кВт теплоти, цей результат полягає в тому, що обладнання не виробляє теплоту, а переносить її. Отже, показники енергоефективності роботи циклу парокompресійного ТН «повітря-вода», коефіцієнт перетворення COP ТН і ексергетичний ККД  $\eta_{ex}$  парокompресійного ТН «повітря-вода» суттєво залежать від середньотермодинамічних температур входу і виходу теплоти, а також довкілля.

### Висновки

1. Проведено термодинамічне дослідження ефективності застосування парокompресійного ТН «повітря-вода» для системи опалення приміщення при використанні повітря як джерела низькопотенційної теплової енергії.

2. Незважаючи на свою ефективність парокompресійні повітряні ТН далеко не завжди повноцінно покривають теплове навантаження будівель в дуже сильні морози, тому необхідно поєднувати їх експлуатацію з додатковим джерелом теплоти: електричним, газовим або твердопаливним котлом, які будуть вмикатися при досягненні вуличної температури певного критичного значення (точки бівалентності).

3. З'ясовано, що енергетична ефективність парокompресійного ТН «повітря-вода», робочим тілом якого є пропан оцінена коефіцієнтом перетворення COP ТН і становить 3,6.

4. Показано, що досконалість перетворення енергії в парокompресійному ТН «повітря-вода» оцінена ексергетичним ККД в залежності від середньотермодинамічних температур  $T_{cp}^B$  і  $T_{cp}^K$  і становить 35 %.

### Список літератури:

1. Малярєнко В. А., Лисак Л. В. Енергетика, довкілля, енергозбереження. Х. : Рубікон, 2004. 368 с.
2. Безродний М. К., Пуховий І. І., Кутра Д. С. Теплові насоси та їх використання : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
3. Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2015. 123 с.

4. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навчальний посібник. Суми : СДУ, 2018. 364 с.
5. Арсеньєв В.М. Теплонасосная технология енергозбереження. Суми : Вид-во СДУ, 2009. 251 с.
6. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Findings of modern engineering research and developments : Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing». 2022. P. 24–40.
7. Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки : навчальний посібник. К. : КНУБА. 2002. 124 с.
8. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання : монографія / під. ред. акад. НАН України А.А. Долінського ; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. К. : 2008. 104 с.
9. Безродний М.К., Притула Н.О. Енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання : монографія. К. : НТУУ «КПІ». 2012. 208 с.
10. Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання // Центрально-український науковий вісник. *Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 136–142.
11. Босий М.В. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса на ґрунтових водах. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group „, Vědecká perspektiva“*, 2022. Str. 556–568.
12. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса : Студия «Негоциант», 2006. 712 с.
13. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання : монографія. Вінниця : ВНТУ. 2009. 176 с.
14. Арсеньєв В. М., Гречаненко В. А. Эксергетическая оценка эффективности теплонасосной технологии энергосбережений. *Вісник Сумського державного університету*. 2002. № 9(42). С. 81–85.

#### **Bosyi M.V. ENERGY EFFICIENCY OF THE AIR HEAT PUMP ON ENVIRONMENTALLY CLEAN PROPANE WORKING BODY**

*The article considers the problem of using a heat pump (HP), which works on alternative energy sources for heating and hot water supply of buildings. In its work TN uses low-potential heat, air. The factors influencing the energy efficiency of HP are determined, the peculiarities of air HP operation for the climatic conditions of Ukraine are estimated. The influence of the duration of air temperatures of different quantities on the heat productivity of HP is analyzed. To increase the efficiency of the heat pump system, a scheme of utilization of low-potential heat with the use of air is given. On the basis of the conducted researches it is established that the advantage of air as a heat carrier is that air HPs can work practically everywhere and do not demand arrangement of a low-temperature contour. A promising way to increase the efficiency of HP in the annual cycle of its work is the combined use of low-potential heat of soil and air. Heat pump system with two energy sources provides high heat output throughout the year and has a higher energy efficiency compared to traditional solutions. HPs have a significant advantage over other thermal power plants. They consume energy from renewable sources, reduce the cost of electricity by more than half is a fully automated device. The analysis of efficiency of heat supply systems shows that now in modern economic conditions heat supply systems can develop in the following direction: application of steam-compression air HP, at use of external air and air of exhaust ventilation of the industrial enterprises for increase of thermal characteristics of buildings. Modernization with the application of these measures can significantly improve the economic and technical characteristics of heat supply equipment. Energy efficiency of air-to-water HP according to the COP TN conversion factor: is equal to 3.6. Exergetic efficiency which characterizes perfection of conversion of energy in TN “air-water” makes 35%.*

**Key words:** heat pump, thermodynamic cycle, low-potential heat source, heat supply systems, heat transformation coefficient, exergetic efficiency.

УДК 621.311  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>

**Купін А.І.**

Криворізький національний університет

**Осадчук Ю.Г.**

Криворізький національний університет

**Савицький О.І.**

Криворізький національний університет

**Шерстньов Ю.В.**

Криворізький національний університет

## ДО ПИТАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Метою роботи є обґрунтування застосування нових підходів до підвищення якості напруги живлення та струму підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів, а також поліпшення комутаційних процесів включення, відключення ФКУ.*

*Виконано технологічний аудит підвищення ефективності напруги живлення підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів. Проведено лабораторні експериментальні дослідження, електронне моделювання, а також теоретичний аналіз та узагальнення результатів досліджень за стандартними та новими методиками. В результаті проведено моделювання у програмному забезпеченні MatlabSimulink увімкнення та вимкнення компенсуючих пристроїв на підстанціях з метою визначення їх негативного впливу на параметри мережі та життєвий цикл комутаторів.*

*Виконано моделювання та розглянуті різні варіанти комутації конденсаторних установок ФКУ з метою оцінки їх негативного впливу на мережу живлення. Запропоновані методи корекції параметрів потужності ФКУ, які забезпечують мінімальну плату підприємства за реактивну потужність з урахуванням реальних режимів навантаження споживачів.*

*Для поліпшення якості параметрів мережі найчастіше застосовуються ФКУ, що виконують функцію компенсації реактивної потужності і фільтрації складових гармонійних параметрів електромережі. Комутація конденсаторних установок часто призводить до виникнення значних завищень напруги та струму і зменшення їх життєвого циклу, що призводить до додаткових збитків. Тому вивчення роботи ФКУ для підвищення якості напруги підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів – важливе наукове та практичне завдання.*

*Наведено основні наукові та практичні результати при обґрунтуванні підвищення якості напруги і струму підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів. В результаті моделювання визначено раціональний момент, з урахуванням інерційності вимикачів, перемикачів конденсаторних установок, що забезпечує найкращі показники параметрів мережі. Цей момент – момент переходу графіка фазного струму через нуль при найменшому можливому навантаженні. При цьому знижується вплив вищих гармонійних на параметри живлячої мережі та збільшується життєвий цикл комутаторів.*

**Ключові слова:** гірничо-збагачувальні комбінати, мережі живлення, якість параметрів електромережі, енергоефективність.

**Постановка проблеми.** Витрати на електроенергію будь-якого промислового виробництва суттєво залежать від її якості. Якість енергії може залежати у свою чергу, як від постачальника енергії, так і від характеру навантаження споживача. Однією із складових якості вважається реактивна складова потужності електроенергії, яка спожива-

ється підприємством. Вона не виконує корисної роботи, а служить для створення магнітних полів в індуктивних приймачах, при цьому електроенергія, що запасується в кожному індуктивному елементі, поширюється по мережі, здійснюючи коливальні рухи (від споживача до генератора і назад). Щоб вона не виходила за межі підприємства до

мережі постачальника енергії, на рівні державних законодавчих актів і договорів між виробником та постачальником обмежується споживання реактивної потужності. Показником споживання реактивної потужності  $Q$  є коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = P/S$ , який показує співвідношення активної потужності  $P$  та повної потужності  $S$ .

Навантаження в промислових мережах зазвичай має індуктивний характер, що викликає споживання, крім активної потужності, істотної частки реактивної потужності. Збільшена, у зв'язку з цим повна потужність, що споживається, призводить, у свою чергу до наступного:

- збільшення плати постачальнику електроенергії;
- додаткові втрати у провідниках внаслідок збільшення струму та, отже, зменшення пропускної спроможності мереж;
- завищення потужності трансформаторів та перерізу кабелів, відхилення напруги мережі від номіналу;
- зниження якості електроенергії.

З метою усунення зазначених негативних ефектів застосовуються ФКУ, які виконують функцію компенсації реактивної потужності і фільтрації складових гармонійних параметрів електромережі. Комутація ФКУ часто призводить до виникнення значних завищень напруги та струму і зменшення їх життєвого циклу, що призводить до додаткових збитків.

Питання вибору рівня компенсації необхідно вирішувати з урахуванням чинних тарифів на оплату реактивної потужності. Поточний тариф передбачає оплату споживання реактивної потужності у денний час та оплату за споживання та генерацію реактивної потужності у нічний час.

На підставі добових графіків споживання реактивної потужності для підстанцій «ПрАТ «ПівнГЗК» (м. Кривий Ріг) визначено оптимальні значення встановлюваних компенсуючих пристроїв для забезпечення мінімальної плати за реактивну потужність. На рис. 1 для головної понижувальної підстанції (ГПП-1) точки мережі комбінату наведено синтезовані графіки оплати підприємства за споживану та генеровану реактивну потужність, потовщеною лінією показаний графік вибору ємності конденсаторних установок для мінімізації оплати за неї.

На графіках показано:

- сумарна плата за реактивну потужність (чорна лінія);
- плата за споживання реактивної потужності вдень (зелена лінія);
- плата за споживання реактивної потужності у нічний час (червона лінія);
- плата за генерацію реактивної потужності у нічний час (синя лінія).

Як видно з графіків, загальна плата за реактивну потужність (чорна лінія) має яскраво виражений мінімум, що свідчить про потенціал зниження плати за реактивну потужність. Для підстанцій, що мають потужне навантаження від синхронних двигунів технологічних механізмів, самі синхронні двигуни не завантаженні, як показали дослідження, можуть використовуватися для компенсації реактивної потужності. На базі цих досліджень розроблений та захищений Патентом України спосіб підвищення енергоефективності технічних систем із синхронними двигунами, що працюють у режимі компенсації реактивної потужності [1].

Проведено моделювання у програмному забезпеченні MatlabSimulink увімкнення та вимкнення

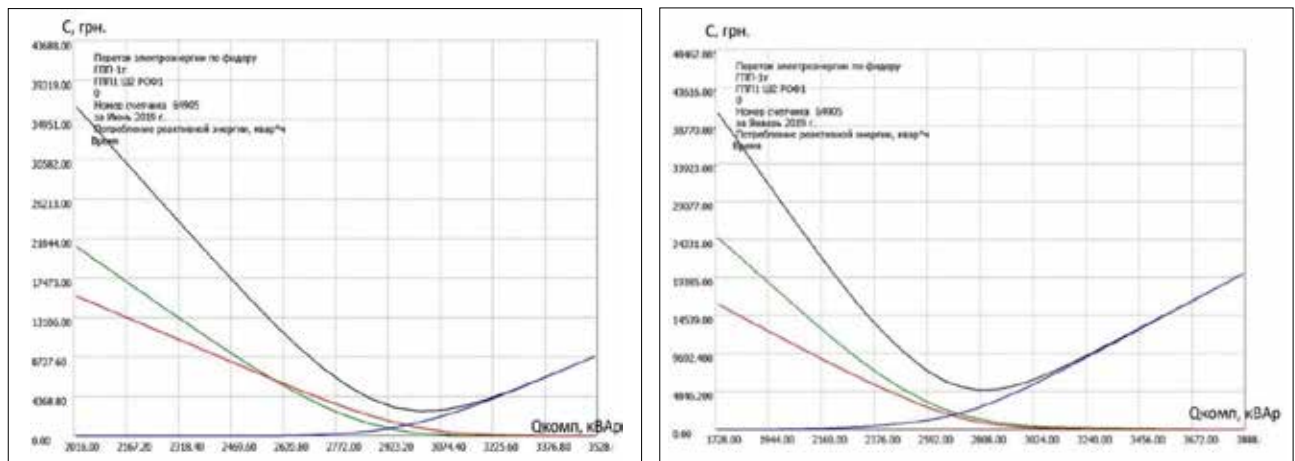


Рис. 1. Економічне обґрунтування вибору рівнів компенсації для точки ГПП-1 у зимовий (праворуч) та літній (ліворуч) період роботи



ступенів компенсуючих пристроїв на підстанціях з метою визначення їх негативного впливу на параметри мережі.

Комутація конденсаторних установок найчастіше веде до виникнення значних перенапруг, особливо в мережах, насичених вищими гармонійними. Розглянемо проблему перенапруги при використанні вакуумних вимикачів з урахуванням особливостей дугогасного середовища та конструкцій цих апаратів, а також навантажень, що ними комутуються. При включенні навантаження (трансформатора, електродвигуна, конденсаторної батареї) правильно спроектованим вимикачем (що не дає відскоків контактів) його дугогасне середовище з погляду виникнення перенапруги не відіграє ніякої ролі. Перенапруження в цьому випадку обумовлені особливостями мережі та комутуваного приєднання як багатоконтурних індуктивно-ємнісних схем, моментом включення за часом та розкидом у замиканні контактів різних фаз вимикача [12].

Основними причинами перенапруги на ізоляції окремого приєднання (і тільки його, а не всієї мережі) при відключенні навантаження, пов'язаними з особливостями дугогасного середовища та конструкцією вимикача, є зріз струму та ескалація напруги.

При перехідних процесах при включенні конденсаторів виникають короточасні кидки струму, які можуть перевищувати номінальний струм (амплітудою до 550%). Все це змушує підходити до комутаційних процесів з особливою обережністю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізуючи дослідження та публікації з питань, близьких до проблематики підвищення якості напруги живлення підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів, варто відмітити наступні роботи Железко Ю.С. [13], а також Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Александрова Д.С., Щербакова Е. Ф., Саприки А.В. [14–17] та низки інших дослідників.

**Постановка завдання.** Так, за даними зарубіжних досліджень, втрати країн Європи від неякісної електричної енергії щорічно досягають десятки млрд. євро. Аналогічних даних щодо України нині немає, оскільки проблемою якості електричної енергії систематично займаються лише вчені, і це при тому, що збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію щорічного зростання (у США, наприклад, за останні десять років вони подвоїлися).

Одним із простих та дешевих способів усунення всіх цих недоліків мереж є компенсація реактивної потужності шляхом підключення конденсаторів у різних точках мережі [13]. Найбільш ефективними пристроями компенсації є автоматичні системи компенсації реактивної потужності (АСКРП), які дозволяють автоматично максимально зрівнювати споживану та реактивну потужність, що виробляється в системі.

Крім того, застосування потужних напівпровідникових перетворювачів для регулювання параметрів електродвигунів призводять до появи вищих гармонійних та негармонічних складових напруги та струму мережі. Тому найчастіше тепер застосовуються фільтро-компенсуючі пристрої (ФКУ), що виконують функції компенсації реактивної потужності та фільтрації складових (вищих гармонік) параметрів електромережі [14]. Комутація ФКУ призводить до значних кидків струму, які в свою чергу значно знижують життєвий цикл комутуючої апаратури. Для вирішення питання кидків струму необхідно провести моделювання різних варіантів комутації ФКУ.

Отже, для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Виконати моделювання та розглянути різні варіанти комутації конденсаторних установок ФКУ з метою оцінки їх негативного впливу на мережу живлення.

2. Запропонувати методи корекції параметрів потужності ФКУ, які забезпечують мінімальну плату підприємства за реактивну потужність з урахуванням реальних режимів навантаження споживачів.

3. За результатами моделювання запропонувати варіант комутації, при якому збільшиться життєвий цикл елементів ФКУ.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Проведемо моделювання підключення конденсатора в однофазній синусоїдальній системі в різні моменти часу. Умовні параметри схеми наступні:

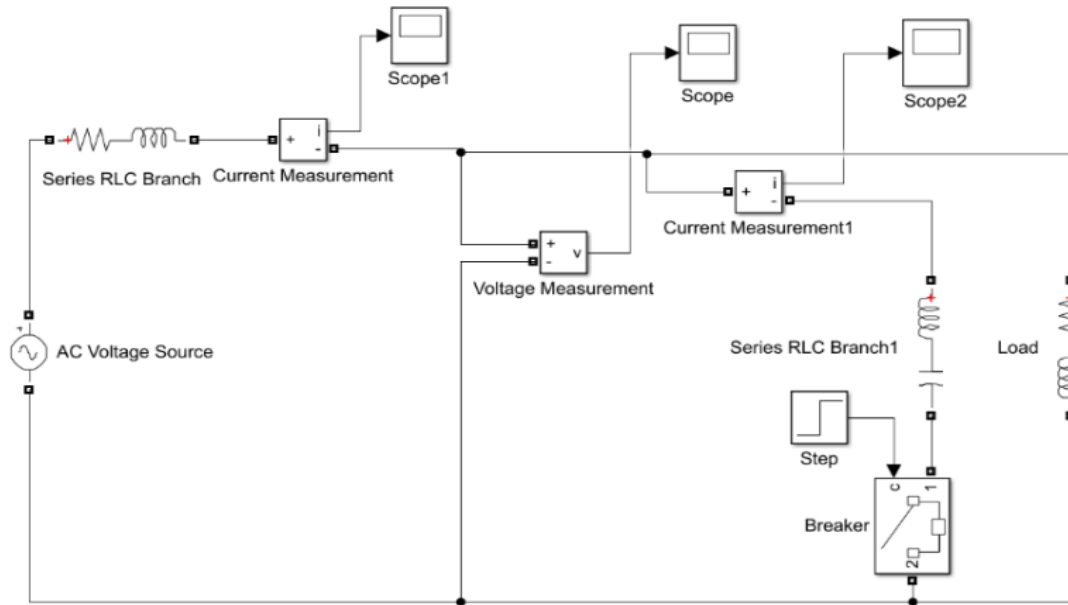
ACVoltageSource:  $U = 380\text{В}$ ,  $f = 50\text{Гц}$ .

SeriesRLCBranch:  $R = 0,01\text{Ом}$ ;  $L = 3,18\text{мкГн}$ .

Load:  $R = 1\text{Ом}$ ;  $L = 10\text{мкГн}$ .

Series RLC Branch1:  $L = 25\text{мкГн}$ ;  $C = 1\text{мФ}$ .

Дана модель дозволить імітувати комутацію конденсаторної батареї у різні моменти часу, внаслідок чого відбуваються зміни струму на лінії (рис. 3, а, б, в), струму на конденсаторі (рис. 4, а, б, в). Проведемо включення конденсатора у такі моменти часу: 30 ел. град (0,005/3 с.); 90 ел. град (0,005 с.); 180 ел. град. (0,01 с.).



**Рис. 2. Модель системи підключення конденсатора в однофазній синусоїдальній мережі в програмному забезпеченні MatlabSimulink**

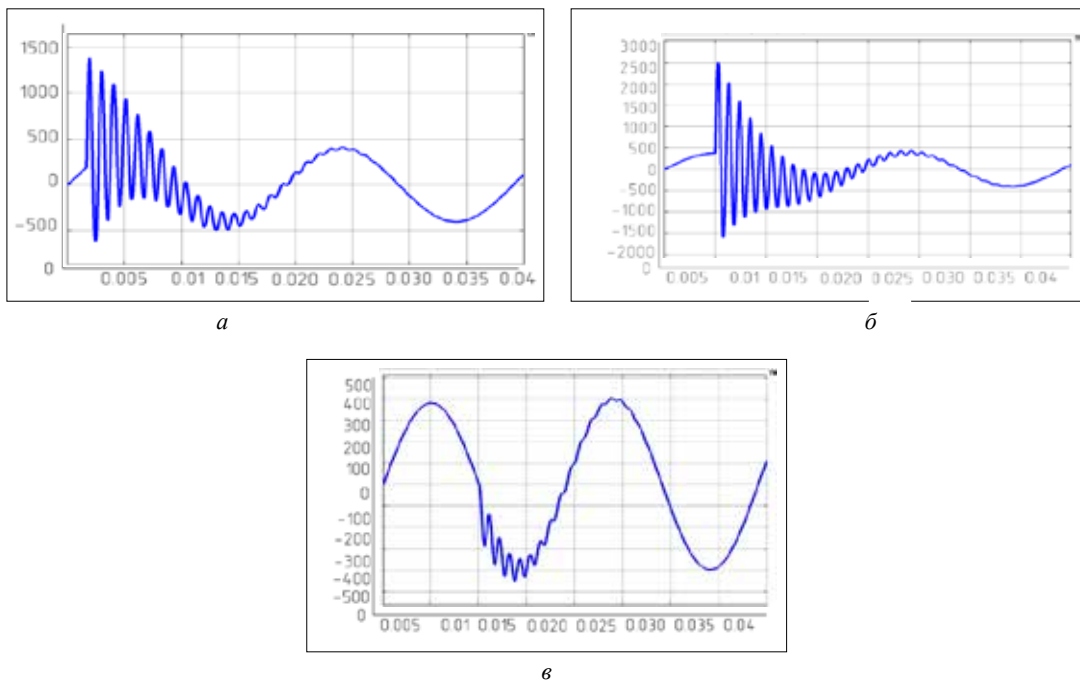
При цьому необхідно враховувати, що при моделюванні не враховуються деякі дійсні параметри досліджуваних ланцюгів, і тому виникають деякі завищені пікові показники струмів та інших параметрів моделі.

Результати моделювання:

– 30 ел. град (0,005/3 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії виник значний кидок

струму (рис. 3 а), після чого почався коливальний загасаючий процес. Кидок струму становить близько 300 % від номінального значення, час загасання процесу – 0,025 с.

– 90 ел. град (0,005 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії виник значний кидок струму (рис. 3, б), який порівняно з попереднім випадком (рис. 3, а) значно більший. Після кидка почався



**Рис. 3. Струм на лінії (CurrentMeasurement) в моменти вклучення:**  
 (а) – 30 ел. град (0,005/3 с.); (б) – 90 ел. град (0,005 с.); (в) – 180 ел. град. (0,01 с.)

загасаючий коливальний процес. Кидок струму становить 500 % від номінального значення, час згасання процесу – 0,03 с.

– 180 ел. град. (0,01 с.). В результаті комутації конденсатора на лінії не виникло значних кидків струму (рис. 3, в).

– кидок струму становить близько 1000 % від номінального значення, час згасання процесу – 0,03 с. 30 ел. град (0,005/3 з.) (див. рис. 4, а).

– 90 ел. град (0,005 с.). В результаті комутації конденсатора на конденсаторі виник значний кидок струму (1750% від номінального значення), який, порівняно з попереднім випадком (включення конденсатора в момент 0,005/3 с.), значно більше (див. рис. 4, б). Після кидка почався загасаючий коливальний процес. Час згасання процесу – 0,03 с

– 180 ел. град. (0,01 с.). Внаслідок комутації конденсатора на останньому виник незначний кидок струму (рис. 4. в) (амплітудою до 150 %) у порівнянні з попередніми випадками (див. рис. 4, а, б). Після кидка почався загасаючий коливальний процес. Час згасання процесу – 0,03 с.

Проаналізувавши графіки перехідних процесів, можна зробити висновок, що оптимальним часом вмикання конденсаторів є час, коли синусоїда проходить через 0.

Для мережі з частотою 50 Гц даний час становить близько 0,01с. Взявши до уваги отримані результати, змодельємо включення конденсаторів

у трифазній системі. Для розрахунку та завдання параметрів моделі використовуємо дані, надані підприємством ПрАТ «ПівніГЗК».

Згідно з наданими даними, було встановлено параметри схеми:

Three-PhaseSeriesRLCLoad(нагрузка):P=8,50МВт; Q=2,87МВАр;

Three-PhaseSource:U=6кВ;f=50 Гц;

Three-PhaseSeriesRLCBranch:R=1мкОм;L=1мкГн.

На підставі добових графіків споживання реактивної потужності з урахуванням оптимальної плати було визначено параметри установок компенсації.

Розрахунок параметрів моделювання.

Відповідно до параметрів споживання реактивної потужності було встановлено оптимальну потужність компенсуючої, яка становить 3000кВАр. Розрахуємо ємність для завдання параметрів моделі у програмному забезпеченні MatlabSimulink (рис. 5):

$$Q_c = \frac{U_c^2}{X_c} \quad (1)$$

Підставимо у формулу (1) значення реактивного опору конденсатора:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Отримуємо:

$$Q_c = U_c^2 \cdot \omega C$$

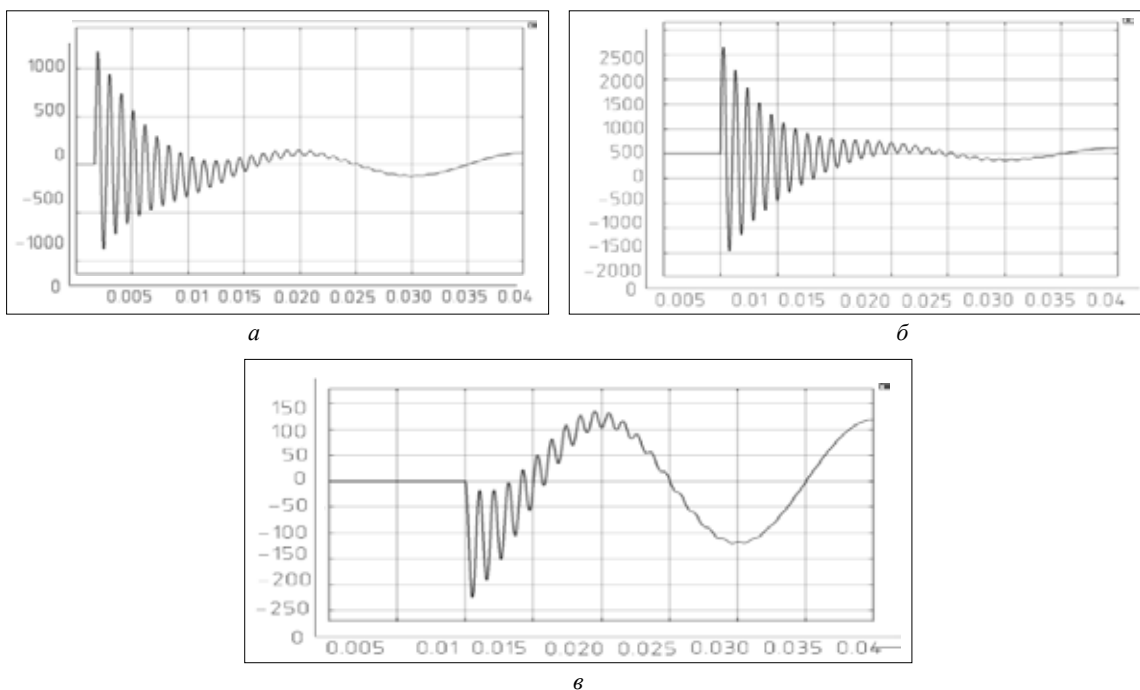


Рис. 4. Струм на конденсаторі (CurrentMeasurement 1) у моменти включення: (а) – 30 ел. град (0,005/3 с.); (б) – 90 ел. град (0,005 с.); (в) – 180 ел. град. (0,01 с.)

Звідки визначимо розрахункову формулу ємності конденсатора:

$$C = \frac{Q_c}{U_c^2 \cdot \omega C} = \frac{Q_c}{U_c^2 \cdot 2\pi f}$$

Отже, ємність конденсатора в даному випадку дорівнюватиме, мкФ:

$$C = \frac{Q_c}{U_c^2 \cdot 2\pi f} = \frac{3000 \cdot 10^3}{6000^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 265.$$

Параметри блоків  $C_a, C_b, C_c$ :  $C = 265$  мкФ.

Параметри реактора обмежуючого струм  $L_a, L_b, L_c = 1$  мГн.

*Результати моделювання.*

Однчасне вмикання конденсаторів (0,01с): Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 6, а) виник значний кидок струму (580 % від номінального значення).

Також можна побачити чітко виражену несинусоїдність струму, що свідчить про наявність гармонік (рис. 6, б). Наявність останніх є вкрай небажаним [12]. Аналізуючи гармонійний ряд для фази А ( $I_{a3}$ ) (див. рис. 6, б), можна зробити висновок, що найбільш значущими по амплітуді є гармоніки під номерами 5, 7 та 11. Коефіцієнт несинусоїдності під кінець перехідного процесу знаходиться не в межах норми та складає 17,63 %.

Послідовне включення конденсаторів

Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 7, а) виник значний кидок струму (180 % від номінального значення).

Також можна побачити чітко виражену не синусоїдність струму, що свідчить про наявність гармонік (рис. 7, б). Наявність останніх є вкрай небажаним [12]. Аналізуючи гармонійний ряд для фази А ( $I_{a3}$ ) (див. рис. 7, б), можна зробити висновок, що найбільш значущими по амплітуді

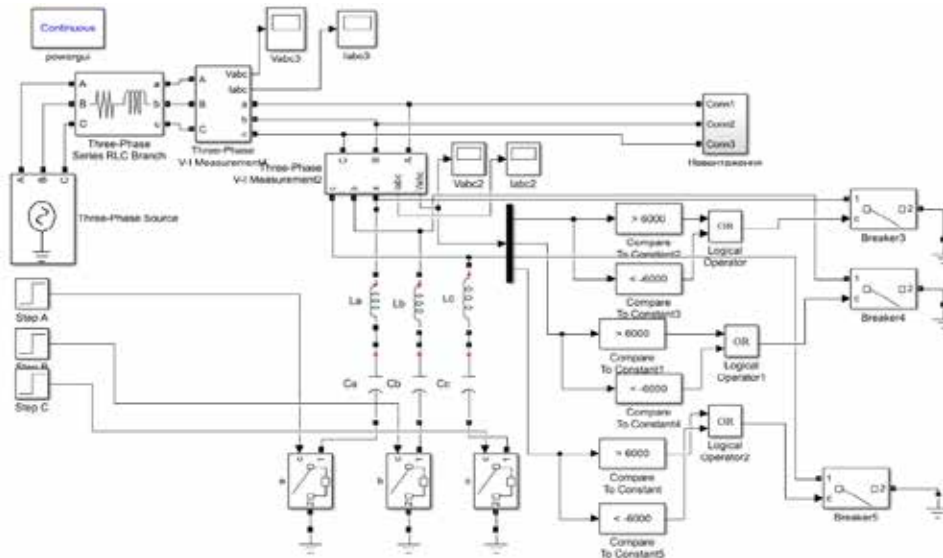
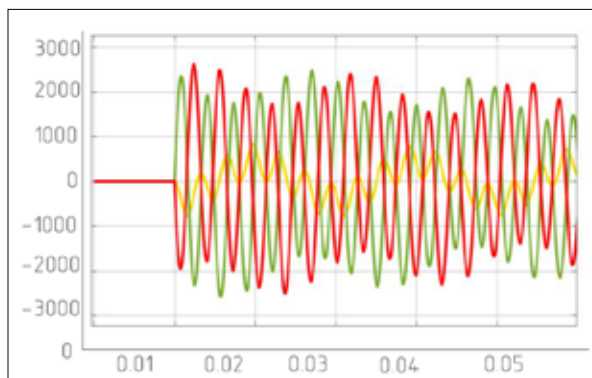
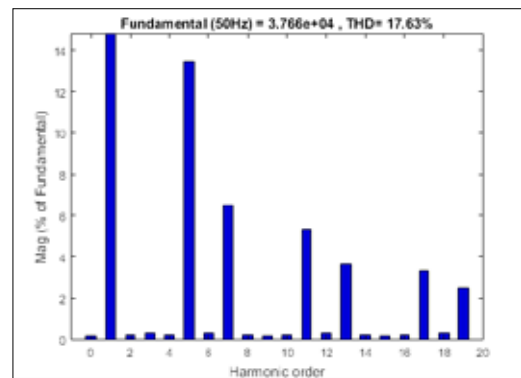


Рис. 5. Модель для дослідження варіантів комутації конденсаторних батарей



а



б

Рис. 6. Струм на конденсаторі (а) і гармонічні складові струму на лінії (б) при одночасному включенні конденсаторних батарей (фаза А-жовтий колір, В – зелений, С – червоний)

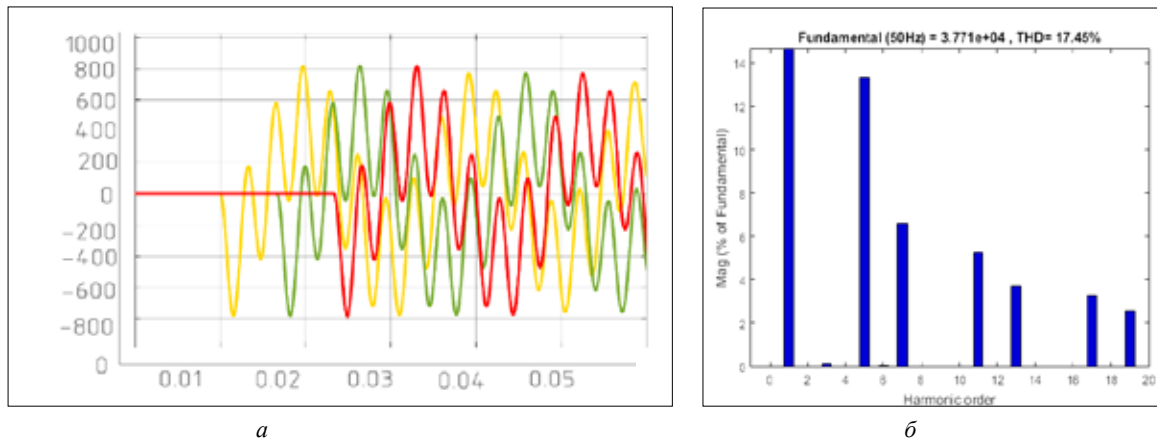


Рис. 7. Струм на конденсаторі (а) і гармонічні складові струму на лінії (б) при послідовному включенні конденсаторних батарей (фаза А-жовтий колір, В – зелений, С – червоний)

є гармоніки під номером 5, 7 та 11. Також, у порівнянні з одночасним включенням батарей, відсутні парні гармоніки, кожна з яких досягала значення до 0,5%. Коефіцієнт не синусоїдності під кінець перехідного процесу трохи зменшився і становить 17,45%.

Проведемо моделювання вмикання ступенів конденсаторних батарей кожної фази за наступним алгоритмом: вмикання першої ступені батареї – вмикання першої половини навантаження ( $P=2500\text{кВт}$ ,  $Q=1450\text{кВар}$ ) – комутація другої ступені – вмикання другої частини навантаження ( $P=6000\text{кВт}$ ,  $Q=1450\text{кВар}$ ). Інші параметри

моделі аналогічні попереднім. Слід зазначити, що дана логіка вмикання по черговому вмикання ступенів конденсаторних батарей і навантаження застосовується на комбінаті.

Одночасне вмикання конденсаторів (0,01с та 2,01с): Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 9, а) виникли значні кидки струму (560% від номінального значення – під час комутації першої ступені; 570% від номінального значення – під час комутації другої).

Про наявність гармонік свідчить гармонійний аналіз струму (рис. 9, б). Аналізуючи гармонійний ряд для фази А ( $I_{a3}$ ) (див. рис. 9, б), можна зробити

### Увімкнення ступенів конденсаторних батарей

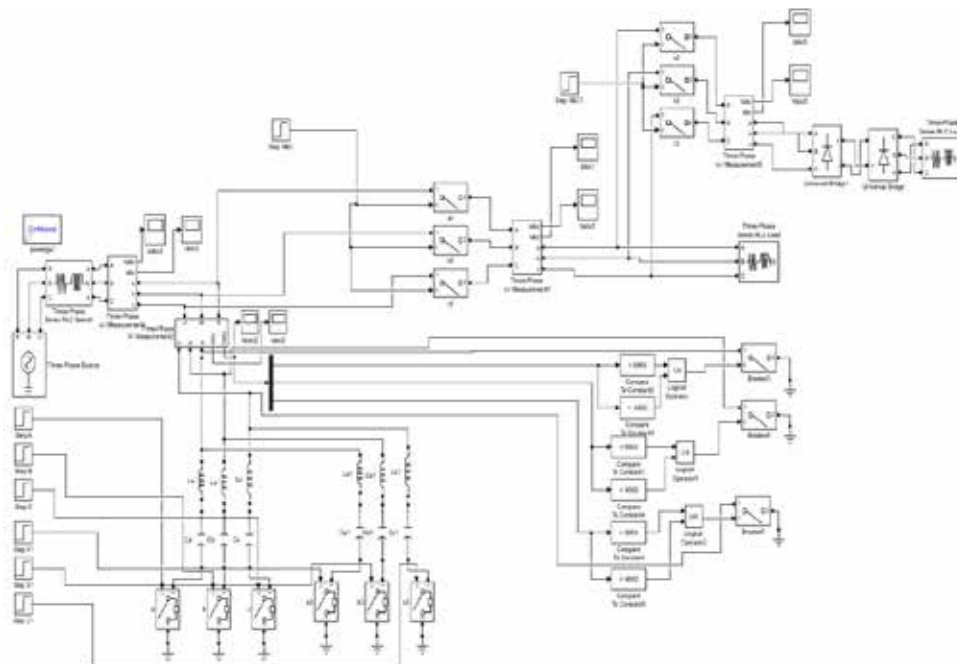


Рис. 8. Модель для дослідження варіантів комутації ступенів конденсаторних батарей у програмному забезпеченні MatlabSimulink

висновок, що найбільш значущими по амплітуді є гармоніки під номерами 5, 7 та 11. Коефіцієнт несинусоїдності під кінець перехідного процесу знаходиться не в межах норми та складає 10,44%.

У порівнянні з одноступеневим варіантом моделі (рис. 5) такий спосіб підключення навантаження та конденсаторних батарей дозволяє приблизно на 10% зменшити початковий кидок струму на конденсаторі. Коефіцієнт несинусоїдальності зменшився майже на 7%, а амплітуди кожної з гармонійних складових – в середньому на 2%.

Послідовне вмикання конденсаторів

Внаслідок комутації конденсатора на конденсаторі (рис. 10, а) виникли незначні кидки струму (97% від номінального значення – під час комутації першої ступені; 146% від номінального значення – під час комутації другої).

Про наявність гармонік свідчить гармонійний аналіз струму (рис. 10, б). Аналізуючи гармонійний ряд для фази А (Ia3) (див. рис. 10, б), можна зробити висновок, що найбільш значущими по амплітуді є гармоніки під номерами 5, 7 та 11. Коефіцієнт несинусоїдності під кінець перехідного процесу знаходиться не в межах норми та складає 10,23%.

У порівнянні з одноступеневим варіантом моделі (рис. 5) такий спосіб підключення навантаження та конденсаторних батарей дозволяє на 40–80% зменшити початковий кидок струму на конденсаторі. Коефіцієнт несинусоїдальності зменшився майже на 7%, а амплітуди кожної з гармонійних складових – в середньому на 2%.

Послідовна комутація конденсаторних батарей кожної фази у випадку комутації батарей ступенями дозволяє значно зменшити початкові кидки струму на 400%. Коефіцієнт несинусоїдальності зменшився на 0,2%.

В результаті моделювання можна зробити висновки, що почергове включення фаз трифазної мережі дозволить майже в 2 рази зменшити початковий кидок струму на лінії і майже в 3 рази в конденсаторі. Ще однією перевагою почергової комутації є те, що такий спосіб дозволяє трохи зменшити спотворення синусоїди. Таким чином, комутація конденсаторних установок призводить до наявності як гармонік струму, так і напруги, причому як показують результати досліджень, вони можуть значно впливати на параметри мережі.

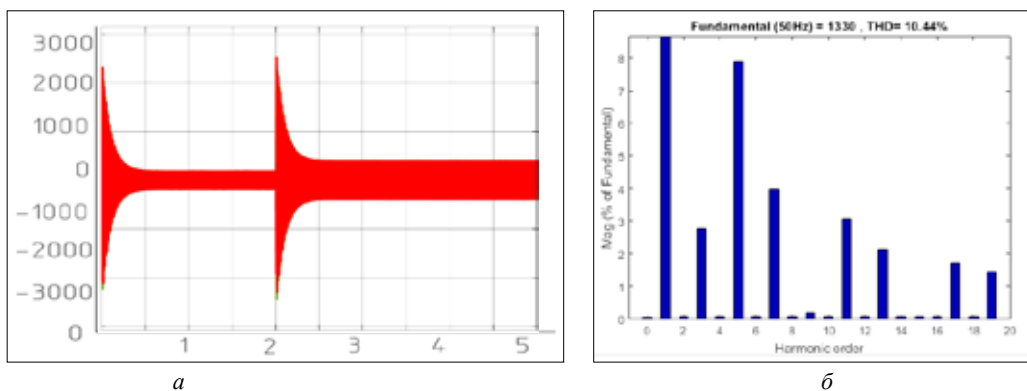


Рис. 9. Струм на конденсаторі на 5-секундному проміжку (а) і гармонічні складові струму на лінії під кінець перехідних процесів (б) при одночасному включенні конденсаторних батарей

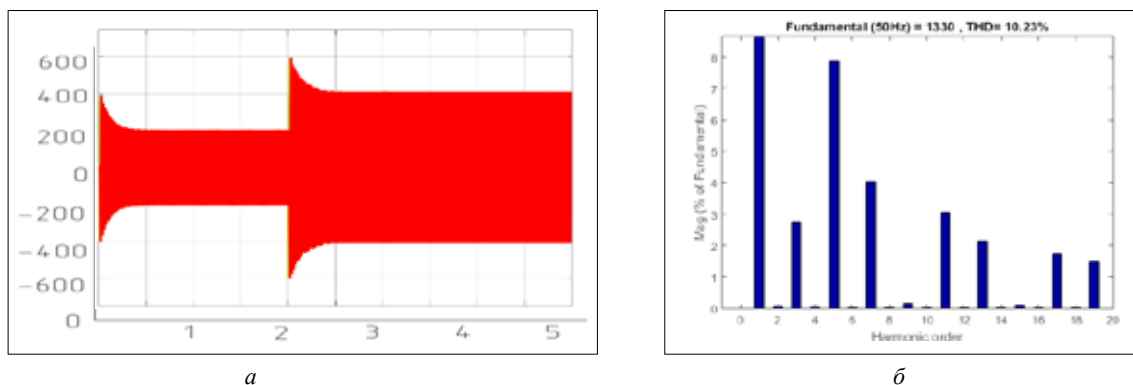
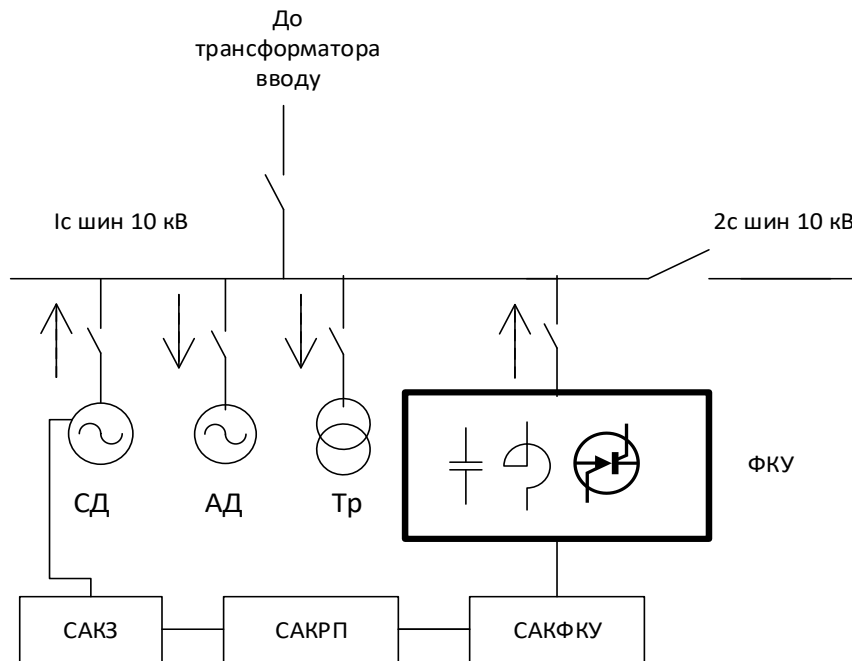


Рис. 10. Струм на конденсаторі на 5-секундному проміжку (а) і гармонічні складові струму на лінії під кінець перехідних процесів (б) при послідовному включенні конденсаторних батарей



**Рис. 11. Структурна схема системи керування реактивною потужністю (САКРП):**

САКЗ – система автоматичного керування збудженням СД;  
САКФКУ – система автоматичного керування щаблями ФКУ

Наявність гармонік є вкрай небажаним явищем, яке необхідно усунути. Виходячи з результатів моделювання, вибір гармонік для їхнього подальшого погашення слід вибирати виходячи з методу комутації конденсаторних батарей.

Пропонується структура системи автоматизованого керування збудженням СД та переключенням щаблів ФКУ для компенсації реактивної потужності в середині мережі підприємства у функції балансу її потоків між споживачами (двигуни АД, трансформаторами) та від ФКУ та СД, напрямки цих потоків показані на рис. 11.

Перспективні напрями досліджень.

Як варіанти для подальших досліджень у цій темі можливо, наприклад, розробка алгоритмів для регулятора реактивної потужності; дослідження варіантів гасіння перенапруг при комутації енергоємних споживачів.

#### Висновки

1. На підставі добових графіків споживання реактивної потужності потужних підстанцій підприємства ПрАТ «ПівніГЗК», існуючих розрахункових тарифів, запропоновано методику вибору потужності компенсуючих пристроїв, що забезпечує мінімальну плату підприємства за реактивну потужність.

2. Для підстанцій, що мають потужне технологічне обладнання з синхронними двигунами, запропонований спосіб підвищення енергоефек-

тивності внутрішніх та зовнішніх мереж, здійснюючи компенсацію реактивної потужності за допомогою цих СД. Зазначений спосіб захищений патентом України.

3. Проведено моделювання та розглянуто різні варіанти комутації конденсаторних установок з метою оцінки їх негативного впливу на мережу живлення.

4. В результаті моделювання можна зробити висновки, що почергове включення фаз у трифазній мережі дозволить майже в 2 рази зменшити початковий кидок струму на лінії та майже в 3 рази на конденсаторі. Ще однією перевагою почергової комутації є те, що такий спосіб дозволяє зменшити спотворення синусоїди. Визначено раціональний момент включення (перемикання) конденсаторних установок, що забезпечує найкращі показники параметрів мережі. Цей момент – момент переходу графіка струму через нуль. При цьому знижується вплив вищих гармонійних на параметри мережі живлення. Дослідження на моделі підтверджують це.

5. Запропоновано структуру системи автоматизованого керування збудженням СД, та переключенням щаблів ФКУ для компенсації реактивної потужності в середині мережі підприємства у функції балансу її потоків між споживачами (двигуни АД, трансформаторами) і від ФКУ та СД.

Список літератури:

1. Патент № 141771 Україна. Способ повышения энергоэффективности технических систем технологических агрегатов с синхронными приводами путём регулирования их реактивной мощности / Кочубей А.И., Осадчук Ю.Г., Козакевич И.А., Шерстньов Ю.В. и т.д. Опубл. 27.04.2020. Бюл. № 8.
2. Ключев Р. В., Босиков И. И., Гаврина О. А., Ляшенко В. И. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):211–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>.
3. Bornschlegl M., Bregulla M., Franke J. Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies. *Journal of Cleaner Production*, 2016, Vol. 1351, pp. 644–656.
4. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, Vol. 101, pp. 243–259.
5. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.
6. Buryanina N., Korolyuk Yu., Koryakina M., Suslov K., Lesnykh E. Four Samples Method for the Selection of Sinusoidal Components Parameters of Power System Emergency Mode. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, Russia, 1–4 October 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934775.
7. Усманова Т.Х., Исаков Д.А. Актуальные вопросы электроэнергетических затрат добывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2018. № 6 (142). С. 30–33.
8. Kupin, A., & Senko, A. (2015). Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes. *CEUR Workshop Proceedings*, (1356), pp. 153–160.
9. Kupin, A., Vdovichenko, I., Muzyka, I., & Kuznetsov, D. (2017). Development of an intelligent system for the prognostication of energy produced by photovoltaic cells in smart grid systems. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8(89)), pp.4-9.
10. Патент № 151007 Україна. Пристрій для підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами / Осадчук Ю.Г., Кузнєцов Д.І., Калдарарь О.П., Купін А.І., Козакевич І.А., Учитель О.Д. та ін. Опубл. 25.05.2022. Бюл. № 21.
11. Niculescu, T., Arad, V., Marcu, M., Arad, S., & Popescu, F.G. (2020). Safety barrier of electrical equipment for environments with a potential explosion in underground coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), P. 78–86. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.078>
12. Тарабин И.В., Скоков Р.Б., Терехин И.А., Горбачев С.А. Компенсация реактивной мощности как метод повышения качества электрической энергии и сокращения потерь на примере данных «МРСК СИБИРИ». *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2 (ч. 22). С. 4876–4879.
13. Железко Ю.С. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2018 / Том 22, № 7 (138) 2018. М. : Энергоатомиздат, 2018. С. 123-146.
14. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М. : Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
15. Надёжность и качество электроснабжения предприятий / Александров Д. С., Щербаков Е. Ф. Ульяновск : УЛГТУ, 2010. 155 с.
16. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. М. : Энергоатомиздат. 2000. 331 с.
17. Сапрыка А.В. Повышение энергоэффективности осветительных комплексов с учётом качества электрической энергии : монография. Харьков : ХНАМГ, 2009. 126 с.

**Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I., Sherstnov Yu.V.**

**ENHANCEMENT OF THE VOLTAGE SUPPLY QUALITY OF SUBSTATIONS AT MINING AND PROCESSING PLANTS**

*The article aims to substantiate application of new approaches to enhance the quality of voltage supply and current of substations at mining and processing plants along with improvement of switching-on/off processes of the filter compensating device.*

*There is performed a technological audit of enhancement of voltage supply efficiency of substations at mining and processing plants. The results of experimental researches are analyzed and generalized applying new and standard techniques. Based on the obtained results of switching-on/off processes of the filter compensating device are simulated applying Matlab Simulink to determine their negative effect on the power grid parameters and switchers life cycle.*



*Various options of switching capacitor units of filter compensating devices (FCD) are simulated and considered to evaluate their negative effect on the power network. Methods of correcting FCD power parameters are suggested to provide the enterprise's minimum payment for reactive power considering consumers' actual loading modes.*

*To enhance the quality of power network parameters, filter compensating devices are widely used to compensate for the reactive power and filter components of harmonic parameters of the power network. Switching of capacitor units often leads to significant voltage and current exceeding and their life cycle reduction resulting in additional losses. Therefore, examination of the filter compensating devices operation to enhance the quality of voltage supply of substations at mining and processing plants is of great scientific importance and practical value.*

*The work presents main scientific and practical results to substantiate the enhancement of the voltage supply and current of substations at mining and processing plants. Simulation enables determining a rational moment considering the inertia of the switchers, capacitor unit switching that provides the best of power grid parameters. This moment denotes the phase current graph crossing zero at the lowest possible load. At the same time, the effect of the higher harmonics on power network parameters reduces and the life cycle of the switchers increases.*

**Key words:** *mining and processing plants, power network, quality of power network parameters, energy efficiency.*

UDC 621.316

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/24>

**Lobodzinskiy V.Yu.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Buryk M.P.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Spinul L.Yu.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Chybelis V.I.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Illina O.A.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## FEATURES OF SMART GRID TECHNOLOGIES INTRODUCTION IN THE ENERGY INDUSTRY

*Modern power system technologies offer the integration of renewable energy in electricity grids, smart metering, bidirectional communication between decentralized power generation units and a central control system for energy production and consumption. Moreover, the modern energy system requires control, measurement and cybersecurity of energy processes at every point of the grid. The paper considers the introduction of intelligent smart systems in the future, as it has the ability to protect against cybersecurity by expanding the network system for seamless integration of renewable energy sources such as wind, electric vehicles and battery systems using power electronics, solar, which provides smart metering monitor and control energy by mitigating fluctuations in voltage, frequency and current, creating good harmonization between producers, consumers, network operators and the state. As a result, building a Smart Grid is a complex task, starting with a detailed quantification of system requirements, determining the actual goals and the levels of operation needed to achieve them. This research will be an effective and efficient tool for researchers, engineers, transmitter operators and distributors to transform the classical national energy system into an intelligent energy system. The implementation of the Smart Grid concept is impossible without large-scale physical upgrades of generating and network equipment, ensuring the management of technological processes and economic interactions from the local to the national level. It is in the field of power management and development systems that the largest changes are taking place, which should lead to a qualitative transformation of energy supply conditions by increasing levels of automation, information and intelligence at all levels of power management systems and market operations.*

**Key words:** Smart Grid, power systems, power grids, intelligent control, power distribution control systems.

**Formulation of the problem.** Today, many developed countries are implementing scenarios of the so-called energy transition, in which modern energy is transformed into customer-centric energy systems. There is a transition from traditional models to new ones that use significant amounts of dispersed generation, including renewable energy sources and storage devices. Markets are becoming decentralized, infrastructure is becoming intelligent, and consumers are moving to active, prosumer patterns of behavior. The components of the currently dominant energy paradigm that emerged in the late 1920s are: the dominance of hydrocarbon-based electricity sources;

large vertically integrated energy companies; centralized electrical networks; unidirectionality of electricity flows – from the generator to the consumer; simultaneity of electricity production and consumption processes; widespread use of fossil fuels in industry and transport. Components of the future (new) power energy that are currently being formed: "clean energy"; deep decentralization of energy production; increasing the role of electricity in the structure of consumption of fuel and energy resources; decentralized markets, private investment; intellectualization of basic infrastructure, development of Smart Grid technologies; the

transition of consumers to active patterns of behavior; energy storage technologies; increasing energy efficiency; increasing levels of electrification of industry and transport. Drivers of new changes are technological advances in other areas, especially in the fields of transmission and processing of information, information and communication technologies, power electronics and modern methods and models of large systems management.

**Analysis of recent research and publications.**

The classic grid infrastructure, from electricity generation to end users, includes several power devices for the safe and efficient transmission of power generated by the power plant to end users. Such power devices are electric generators, transformers, power switches, transmission and distribution lines, utility meters, relays and fuses. Therefore, each of these components has its potential problems due to old technologies. On the other hand, modern energy system technologies offer integration of renewable energy in electricity networks, smart metering, bidirectional connection between decentralized power generation units and central control system for production and consumption of energy. Moreover, the modern energy system requires control, measurement and cybersecurity of energy processes at every point of the grid.

If any classical energy system is integrated with information and communication technology, the electrical network is transformed into a smart grid and provides a two-way connection between electricity generation and the central control system of energy production and consumption. Smart Grid is a kind of sophisticated technology that not only provides two-way communication, but also has several different aspects, such as accessibility, efficiency, accuracy, controllability, economy, flexibility, interoperability, maintainability, measurability, optimality, reliability, stability, security and scalability [1–3]. All these functions of a smart power system make the network quite stable in any power failure, voltage drop, power loss, voltage and frequency fluctuations, overvoltage and current overload. In addition, the smart grid system brings together producers, operators and consumers, as well as energy policy makers. While the classic electricity grid consists only of producers and operators at the national level, the smart grid includes the consumer as a producer electricity.

Thus, all these activities, such as electricity generation, bidirectional communication, integration of renewable energy sources, etc., are in the interests of state technical infrastructures to balance the

production and demand for electricity resources.

Power outages or disruptions in the national power system affect millions of people in the country and cause numerous economic losses in terms of business and production, as well as low living standards. In addition, transmission and distribution losses in the world vary from 5 % to 20 % depending on the energy system infrastructure.

Unfortunately, power outages are a common occurrence for Ukrainian consumers. The average duration of scheduled outages for the client in 2019 in our country was 478 minutes. This is three times more than in the European Union. And the average duration of unscheduled outages in our country was 683 minutes, which is 7 times more than in the EU. At the same time, technological losses of electricity for its transmission and distribution in Ukrainian networks amounted to almost 12 % of total output, or more than 1.5 times higher than the European average and more than twice the level of losses in developed countries. The introduction of Smart Grid will help to overcome these and other negative phenomena in the power industry [4].

It is necessary to note the intensive progress in the process of transition to digital, and in fact – to intelligent electricity, which is carried out with the active support of the state in Europe, the United States, Japan and Korea. In particular, new rules are being introduced in European electricity markets, which will further attract RES, increase competition and flexibility of energy systems, increase consumer participation and increase investment [5–10].

**Setting objectives.** The future introduction of intelligent smart systems is a priority, as it has the ability to protect against cybersecurity, helping to expand the network system for seamless integration of renewable energy sources such as wind, electric vehicles and battery systems using power and solar electronics that enable smart monitor and control energy by mitigating fluctuations in voltage, frequency and current, creating good harmonization between producers, consumers, network operators and the state.

As a result, building a Smart Grid is a complex task, starting with a detailed quantification of system requirements, determining the actual goals and the levels of operation needed to achieve them. This research will be an effective and efficient tool for researchers, engineers, transmitter operators and distributors to transform the classical national energy system into an intelligent energy system.

**Presentation of the main research material.** The Smart Grid system consists of a bidirectional

flow of energy combined with information and communication technologies. All power devices used in the network for monitoring and control are smart and interact with each other.

The structure of the classical power grid (Fig. 1) has four main functions: electricity generation (renewable and non-renewable energy sources, including microgrids), electricity transmission (power transformers, power switches, relays, capacitors, power lines, pylons), power distribution, power transformers, transformers meters, fuses, as well as relays) and electricity consumption (houses, factories, street lamps, electric cars and batteries). All functions have a two-way connection to increase the level of automation, informatization, intelligence at all levels of the power system management system.

In addition, the market and operation are mainly related to government regulation, which takes into account electricity prices, investment, the balance between electricity production and demand, some market standards, the integration of renewable energy systems into the national grid, preferential tariffs and consumer support.

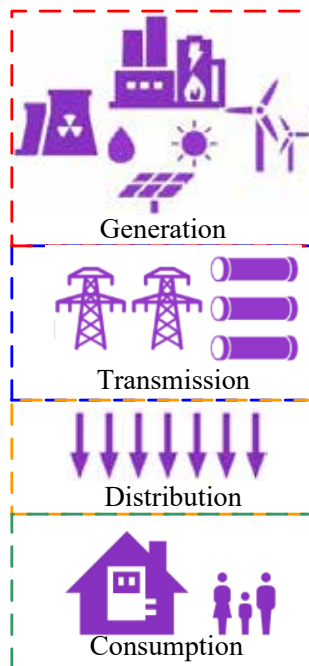


Fig. 1. The structure of the classical power grid

The function of electricity production in fig. 3 has renewable and non-renewable energy sources. Renewable energy sources can be wind, solar, hydro, biomass, biofuels, geothermal, tides and fuel elements, non-renewable energy sources are coal, oil, nuclear and natural gas. However, the concept

of a smart grid is to make as more renewable energy sources as possible.

In the current economic conditions in Ukraine there is a significant number of energy-intensive industries, so energy efficiency and energy independence projects are becoming one of the priority areas of development of the fuel and energy complex (FEC) of the country. The unstable situation in the supply and uneven distribution of energy resources, fluctuations in world prices for them leads to the creation of such conditions for the functioning of the fuel and energy sector, which would ensure a stable level of economic growth. Therefore, the strategy to ensure energy independence and reduce energy consumption creates the preconditions for the development and implementation of modern technologies in the fuel and energy sector. Therefore, many studies have been conducted in the literature to include more renewable sources in the smart grid system.

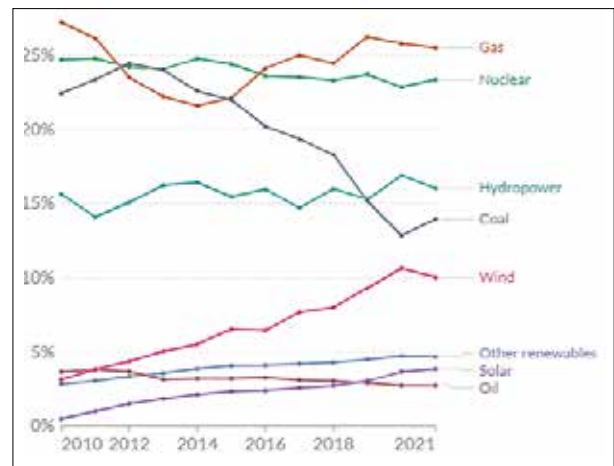


Fig. 2. The share of electricity production in Europe by type of energy resources (2010–2021)

Figure 2 shows the share of electricity production in Europe by type of energy resource. The three main categories of energy for electricity generation are fossil fuels (coal, natural gas and oil), nuclear energy and renewable energy sources. Most electricity is generated by steam turbines that use fossil fuels and nuclear energy. Other power generation technologies include gas turbines, hydro turbines, wind turbines and solar photovoltaic cells [11].

Natural gas remains the main fuel (25%) for electricity generation in Europe, used in steam turbines and gas turbines. Over the last decade, coal has been one of the largest sources of electricity generation, with its share in total production declining from 22% in 2010 to 14% in 2021.

Coal generation is affected by strong price competition from natural gas, wider use of renewable energy sources and, most importantly, new environmental regulations. Currently, new coal-fired power plants are not being built or planned.

Nuclear energy remains one of the main producers of electricity in Europe – 23%. Nuclear power plants use steam turbines for electricity through nuclear fission.

The largest share of electricity generated by renewable energy sources (34%) was in hydropower (16%), the use of wind energy increased from 3% in 2010 to 10% in 2021, solar energy (4%) and others 4%).

The amount of electricity generated by wind has increased significantly over the last decade. This increase is largely due to the availability of financial incentives and renewable energy targets set by the governments of many countries.

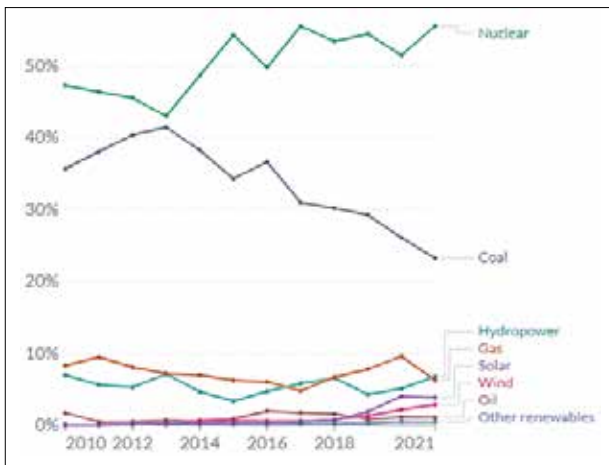


Fig. 3. The share of electricity production in Ukraine by type of energy resources (2010–2021)

In Ukraine, the largest share of produced electricity (Fig. 3) is nuclear (55%) and coal (23%) energy. Renewable energy sources are only 14%. The largest share is hydropower (7%).

In recent years, solar energy has provided about 4% of electricity generation in Ukraine. As more and more electricity is generated from renewable sources, the grid must be able to store solar and wind energy. The system must have the intelligence to store excess sun and wind energy for use at night or on cloudy days.

The distribution of electricity for each country by energy source is summarized in fig. 4. It is clear that 42% of all energy in Europe in 2021 is produced by combustible power plants. Poland and Estonia produce most of their electricity from combustible fuels 83% and 62%, respectively.

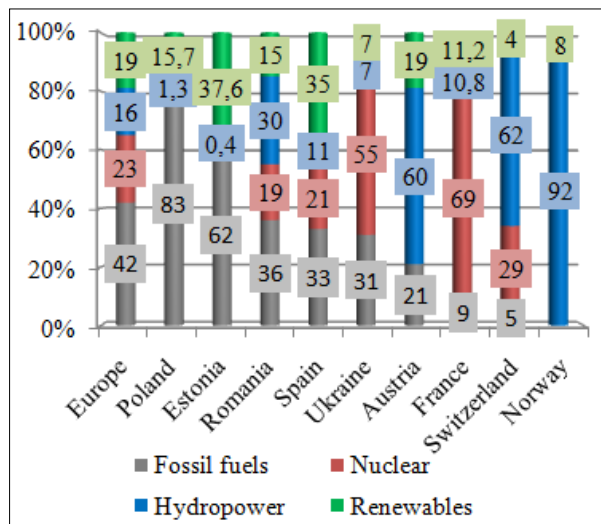


Fig. 4. Distribution of electricity by energy sources, 2021

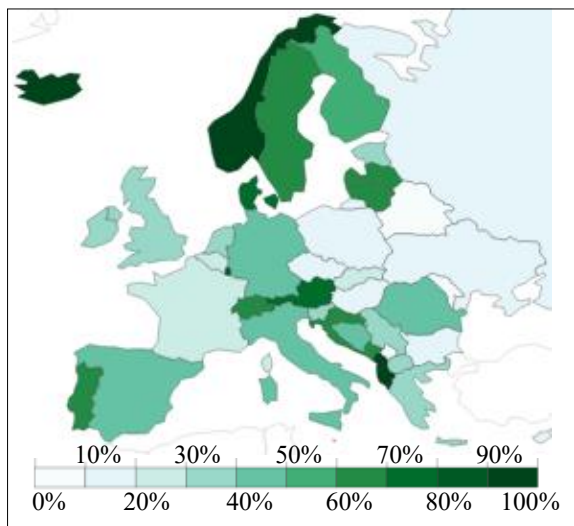
The second largest source of energy used for electricity generation is nuclear power plants, with a share of 23%. Its biggest drivers are France (69%) and Ukraine (55%).

Hydropower is developed in many European countries (16%), for example, the share of electricity generated by hydropower in Norway is 92%, Switzerland 62%, Austria 60%, which accounts for more than half of the total distribution of electricity by source in these countries.

Despite the high performance of hydropower in many European countries, the share of renewable energy sources has increased to 19% in recent years. Estonia (37.6%) and Spain (35%) use renewable energy sources to produce electricity, which is a third of the total energy needs of these countries. Also, the use of wind and solar energy increased in Austria (19%), Poland (15.7%) and Romania (15%) [12].

Increasing the share of renewable energy sources in Europe’s total energy needs is a way to use natural resources wisely. This is the concern for the health of future generations and the preservation of Red Book plants and animals. Also, these are new highly skilled jobs that will lead to science and education, will create comfortable conditions in a difficult climate without harming the environment. In fig. 5 Renewable energy sources combine several sources of electricity, including hydropower, solar energy, wind energy, geothermal energy, biomass, and waves and tides. It shows the share of electricity generated from renewable energy sources (the sum of all renewable energy technologies) in Europe.

In Europe, in 2021, for the first time, the amount of electricity generated from renewable sources (38%) exceeded the amount from fuel sources (37%).



**Fig. 5. The share of energy from renewable energy sources in Europe**

One-fifth of the EU's electricity has already come from wind and solar systems. The highest percentage was recorded in Iceland (100%), Albania (100%), Norway (99%), Luxembourg (80%), Austria 79%, Denmark (77%), Sweden (67%), Portugal (63%), Latvia (63%), Lithuania (61%).

Europe relies on wind and solar energy to ensure not only the phasing out of coal by 2030, but also the phasing out of gas generation, as well as the replacement of shut-down nuclear power plants and to meet growing demand for electricity for electric vehicles.

In Ukraine, the production and use of energy from renewable sources is much smaller. At the end of 2021, only 7% of the country's electricity comes from solar or wind power. Although the law stipulates that the goal is to receive a quarter of the required amount from alternative energy by 2030, but experts' forecasts are somewhat more modest. It is estimated that at large stations and in private households due to the "green tariff" by the end of its validity will produce from 13 to 20% of electricity [9–14].

The above information and figures underscore the importance of using the Smart Grid worldwide, as many different energy sources are used to generate electricity.

Power transmission systems in fig. 1 include power transformers, power lines, substations, and power switches. The voltage is the highest and the current is the lowest in the transmission lines to reduce costs and losses with thin electrical cables for long-distance power transmission.

As shown in fig. 1, all electricity is transmitted through power lines that can be installed both

above ground and underground. The Smart Grid system allows you to measure voltage, current and frequency signals at each point of the power line using voltage and current measuring transformers, as well as a frequency meter for monitoring and control purposes.

The block of distribution of the electric power on fig. 1 starts with a step-down transformer and gives several voltage levels to consumers. All smart meters, ammeters, voltmeters, frequency meters, fuses, switches and relays are included in the electricity distribution. To monitor and control all electrical signals, such as voltage, current, frequency, phase angle, sequence of phases, the distribution unit has several measuring sensors and small transformers. All components of the distribution unit interact with each other.

The unit of electricity consumption in fig. 1 is designed for all types of loads, such as factories, houses, street lamps and electric vehicles. Some consumers may produce their own energy from renewable sources or other types of energy and sell this energy to the grid if the energy produced is not consumed. But in this case, a smart meter is needed to measure the flow of power in both directions.

After providing a brief information about the classic network, it can be combined with communication infrastructures and transformed into a system of Smart Grid, as shown in fig. 6. It consists of a classic network as well as a communication infrastructure that includes wired and wireless technologies to set up a communication system between all electrical units and components in a smart grid. Thus, now the whole system is monitored and controlled from one center. In addition, there is a two-way connection that allows the consumer to be a consumer.

The implementation of the Smart Grid concept is impossible without large-scale physical upgrades of generating and network equipment, ensuring the management of technological processes and economic interactions from the local to the national level. It is in the field of control systems for the operation and development of electricity, the most extensive changes are taking place, which should lead to a qualitative transformation of energy supply conditions by increasing levels of automation, information and intelligence at all levels of control systems and market operations [2].

As explained earlier, the use of smart grids provides a number of tasks for management, monitoring, control, security, as well as simplifies, speeds up and optimizes.

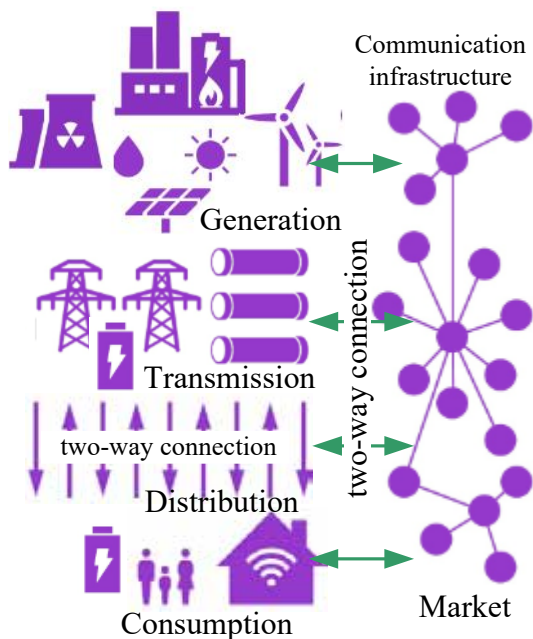


Fig. 6. System of Smart Grid

**Conclusions.** The value of building energy systems based on the Smart Grid concept is that power companies will be able to “smooth out” electricity needs at peak times, avoid the use of hot reserves and reduce the need for long-term investment in additional generating companies, and reduce the need for other investment.

Key elements of the intelligent power grid: Transparency of work – a complete picture of the state of the power system (data transmission of meters, counters and control commands); possibility of management – transfer of power system to any necessary condition; automation – quick adaptation

to changing conditions without user intervention; integration – connection of systems and processes of the electric power enterprise, high intelligence and efficiency of the power system. The presence of these four characteristics, taken together, actually makes the power system intelligent.

Today we can state a combination of three market segments: reliable and flexible networks, intelligent dispersed energy and consumer services. In fact, Smart Grid should be considered as an integrated safe and reliable power system, covering the generation, transport, distribution and final consumption of electricity, the efficiency of which is ensured by operational metering of energy and based on advanced monitoring, communication, analysis and dynamic control. Smart Grid is much broader than technology or hardware, system automation or software development.

The implementation of the Smart Grid concept is impossible without large-scale physical upgrades of generating and network equipment, ensuring the management of technological processes and economic interactions from the local to the national level. It is in the field of power management and development systems that the largest changes are taking place, which should lead to a qualitative transformation of energy supply conditions by increasing levels of automation, information and intelligence at all levels of power management systems and market operations.

Thus, the transformation of a classic network into an intelligent Smart Grid fills its own business areas and provides increased efficiency, loss reduction, flexible price for consumers, safe and stable electricity, as well as reliable and digital infrastructure.

#### References:

1. Colak I., Bayindir R., Sagiroglu S. The Effects of the Smart Grid System on the National Grids. *8th IEEE International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*. Paris, France, 2020. Pp. 122–126. doi: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144891.
2. Денисюк С.П., Стшелецькі Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019, № 3. С. 8–22. doi: 10.20535/1813-5420.3.2019.196368.
3. Денисюк С.П., Махлін П.В., Шрам О.А., Слинько В.М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями). *Технічна електродинаміка*, 2022, №.1, С. 41–49. doi: 10.15407/techned2022.01.041.
4. Олійник С. Електричні мережі стануть «розумними». URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/elektrychni-merezhi-stanut-rozumnymu> (дата звернення 13.06.2022).
5. Lobodzinskiy V. Transient analysis in three-phase cable lines with the transposition phase cables conductive screens during short circuit fault. *IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2021, pp. 413–416. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575468.
6. Лободзинський В.Ю., Чибеліс В.І. Аналіз перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на прикладі високовольтної кабельної лінії. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021, no. 3, pp. 64–69. doi: 10.20535/1813-5420.3.2021.251207.
7. Ostroverkhov N., Buryk N. Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. pp. 1–5. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240903.

8. Ostroverkhov N., Buryk N. Speed Control System of Synchronous Motor Drives with Field Weakening using the Concept of Inverse Problems of Dynamics. *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 2020. pp. 310–314. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160008.
9. Campbell R. J. The Smart Grids: Status and Outlook. URL: <https://fas.org/sgp/crs/misc/R45156.pdf> (дата звернення 13.06.2022).
10. Smart Grid. URL: <https://www.energy.gov/science-innovation/electric-power/smart-grid> (дата звернення 13.06.2022).
11. Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата звернення 13.06.2022).
12. Ember European Electricity Review (2022). URL: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2022/> (дата звернення 13.06.2022).
13. Erneuerbare Energien überholen Gas und Kohle in der EU-Stromerzeugung. URL: <https://www.agora-energiewende.de/presse/neuigkeiten-archiv/erneuerbare-energien-ueberholen-gas-und-kohle-in-der-eu-stromerzeugung/> (дата звернення 13.06.2022).
14. Джерела відновлювальної енергії в сучасній енергетиці. URL: <https://ekotechnik.in.ua/istochniki-vozobnovlyajemoj-energii> (дата звернення 13.06.2022).

### **Лободзинський В.Ю., Бурик М.П., Спінул Л.Ю., Чибеліс В.І., Ілліна О.О. ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ SMART GRID В ЕНЕРГЕТИЧНУ ГАЛУЗЬ**

*Сучасні технології енергосистеми пропонують інтеграцію відновлюваної енергії в електричних мережах, розумне вимірювання, двонаправлений зв'язок між децентралізованими силовими агрегатами генерації електроенергії і центральною системою керування виробництвом і споживанням енергії., запобігання відключенням електроенергії, стійких та безпечних джерел енергії, а також енергоефективність. Більш того, у сучасній енергетичній системі потрібен контроль, вимірювання та кібербезпека енергетичних процесів в кожній точці електромережі.*

*В роботі розглянуто впровадження інтелектуальних розумних систем в майбутньому, оскільки вона має здатність захищати від кібербезпеки, сприяючи розширенню мережної системи для плавної інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як вітер, електромобілі та акумуляторні системи з використанням силової електроніки, сонячна, що забезпечує розумний облік, дозволяє спостерігати та контролювати енергію, пом'якшуючи коливання напруги, частоти та струму, створюючи гарну гармонізацію між виробниками, споживачами, операторами мереж та державою. Як наслідок, побудова Smart Grid постає як складне завдання, що починається з детальної кількісної оцінки вимог до системи, визначення фактичних цілей і необхідних для їх досягнення рівнів функціонування. Це дослідження стане ефективним та дієвим інструментом для дослідників, інженерів, операторів передавачів та розподільників, щоб перетворити класичну національну енергосистему на інтелектуальну енергосистему.*

*Реалізація концепції Smart Grid неможлива без масштабного фізичного оновлення генеруючого і мережевого устаткування, забезпечивши керування технологічними процесами та економічними взаємодіями від локального до національного рівня. Саме у сфері систем керування функціонуванням і розвитком електроенергетики, відбуваються найбільш масштабні зміни, які в результаті мають привести до якісної трансформації умов енергопостачання споживачів за рахунок підвищення рівнів автоматизації, інформатизації та інтелектуальності на всіх рівнях систем керування функціонуванням енергосистеми і ринковими операціями.*

**Ключові слова:** Smart Grid, енергетичні системи, електричні мережі, інтелектуальне керування, системи керування розподілом електроенергії.



**Олійник Ю.С.**

Українська інженерно-педагогічна академія

## АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Економія паливно-енергетичних ресурсів є актуальною задачею на рівні держави в цілому та на рівні окремих промислових підприємств чи побутових приміщень. Ця задача з часом не лише не втрачає своєї актуальності, а й набуває все більшого розмаху, оскільки всі споживачі електричної енергії потребують її надійного та безперебійного постачання відповідної якості та необхідної кількості. Вказані споживачі електроенергії є досить енергоємними. В свою чергу зростання вартості на енергоносії та комунальні послуги обумовлюють використання заходів, які направлені на заощадження паливно-енергетичних ресурсів. Мاستься на увазі проведення енергозберігаючих заходів, які зменшать споживання паливно-енергетичних ресурсів та збільшать рівень грошових заощаджень. Швидкий розвиток промисловості та зростання споживання електричної енергії разом із вичерпністю паливно-енергетичних ресурсів призвело до того, що економія енергоносіїв наразі є першочерговим завданням. З цього моменту енергозбереження та підвищення рівня енергоефективності займають все більш впевнені позиції у переліку важливих завдань.*

*Стаття присвячена проблемам енергозбереження та енергоефективності. Зокрема, розглядаються поняття енергоефективності та енергозбереження, основні завдання та мета енергозбереження, здійснюється аналіз енергозберігаючих заходів, проаналізовано переваги втілення енергозберігаючих заходів. Поняття енергоефективності передбачає більш ефективне використання електроенергії, тобто при зменшенні споживання електричної енергії з одного боку зберегти або навіть збільшити корисну дію від її використання.*

*Енергозберігаючі заходи у побутових та адміністративних спорудах також набувають розповсюдження наряду із промисловими підприємствами. Одним із найважливіших напрямом є підвищення енергоефективності за рахунок реконструкції системи вентиляції, системи гарячого водопостачання та опалення, утеплення даху, фасадів, заміни вікон тощо. Отже, планування та подальше використання енергозберігаючих заходів є важливим напрямом заощадження паливно-енергетичних ресурсів та, як наслідок, одним із факторів економічного зростання держави.*

**Ключові слова:** енергоефективність, енергозберігаючі заходи, паливно-енергетичні ресурси, економія електроенергії, програма енергозбереження, відновлювальні джерела енергії.

### Постановка проблеми

Масштаби глобальних інвестицій в енергоефективність та енергозбереження сьогодні значні, а їх вклад в розвиток попиту на енергію настільки ж великий, як первинних енергетичних ресурсів. Але щоб по-справжньому оцінити величезний потенціал енергетичної ефективності, який, на жаль, менш помітний, ніж запаси нафтових родовищ, в першу чергу необхідна належна політика уряду. З цією метою єдиним найбільш важливим інструментом є встановлення стандартів мінімальної енергоефективності для будинків, офісів, автомобілів, електроприладів тощо. Проте, стандарти енергетичної ефективності поки досить слабкі або зовсім ігноруються. Уряду також слід направити додаткові політичні та економічні заходи на сприяння продовженню інноваційної діяльності та поліпшення енергозберігаючих технологій.

Це дає надію продовження курсу на поліпшення енергоефективності в якості рушійної сили зростання і стійкості економіки.

За останні три століття з моменту початку індустріалізації світова енергетика стала свідком стрімкого зростання, активно зміцнюючи глобальну економіку і соціальний розвиток. У той же час надмірне освоєння традиційних викопних джерел енергії призвело до виникнення цілому ряду проблем, таких, як недостатність ресурсів, забруднення навколишнього середовища і зміна клімату, які загрожують людському існуванню і сталого розвитку. Загальносвітові ресурси викопного палива недостатні, а їх розподіл і споживання не збалансовані. В результаті цього розвиток енергетики в усі більшою мірою контролюється меншістю країн і регіонів. Деякі країни, які відчувають брак ресурсів, все більше і більше залежать від імпорту енергопостачання і стикаються з дуже актуальними проблемами енергетичної безпеки. Крім того, використання викопних джерел енергії привело до серйозного забруднення повітря, води і ґрунту в процесі їх видобутку, транспортування та утилізації. Викид вуглекислого газу від

спалювання викопного палива став важливим фактором, що сприяє глобальному потеплінню, танення льодовиків і підвищення рівня світового океану. У доступному для огляду майбутньому попит на енергію буде продовжувати рости, і традиційну модель розвитку енергетики, засновану на викопному паливі, буде важко підтримувати в умовах зростаючої світової економіки і зростаючого населення світу.

Пошук рішення енергетичних і екологічних проблем для усунення вузьких місць в соціально-економічному розвитку – тепер питання першорядної важливості. У світі, повному чистими енергетичними ресурсами, кількість гідроелектроенергії, берегової енергії вітру і сонячної енергії в розмірі 10 000, 1 000 000 і 100 000 000 ГВт відповідно, більше, ніж достатньо для того, щоб відповідати глобальним потребам в енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тема енергоефективності та енергозбереження вже давно стала актуальною. Вона обговорюється на різних державних рівнях. Все швидше та активніше втілюються в життя енергозберігаючі заходи у промисловості та у побуті, рахуються грошові заощадження при використанні цих заходів та економія паливно-енергетичних ресурсів.

Не можна не відмітити той факт, що програми енергозбереження виходять на всі більш високий рівень та є складовими більш глобальних програм на державному рівні. Також, існують програми з енергозбереження, що мають за мету зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів країни та зменшення рівня викидів вуглекисню, у міжнародній співпраці з європейськими країнами.

Як відмічає автор у [8, с. 6], енергозбереження містить у собі:

- 1) перехід від викопного палива до поновлювальних джерел енергії;
- 2) повна заміна бензинових і дизельних транспортних засобів електричними або водневими засобами або іншим альтернативним транспортом;
- 3) утилізація всіх видів «вторинної» теплової і кінетичної енергії;
- 4) збільшення енергетичної ефективності використання всього нині експлуатованого устаткування й діючих технологічних процесів;
- 5) розвиток і впровадження «енергозберігаючих» економічних законів і стимулів.

Якщо перші складові розраховані на більш тривалу перспективу впровадження, які потребують великих інвестицій та детального алгоритму

втілення, то остання складова направлена на розвиток енергозберігаючих заходів та на ще більше їх використання, при цьому маючи міцну державну підтримку.

Відповідно до цього, звернемо увагу на основні завдання Держенергоефективності [6]:

- 1) реалізація державної політики у сфері ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів, енергозбереження, відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива;
- 2) забезпечення збільшення частки відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива в енергетичному балансі України;
- 3) надання адміністративних послуг у відповідній сфері;
- 4) внесення на розгляд Міністра енергетики пропозицій щодо забезпечення формування державної політики у зазначеній сфері.

**Мета статті.** Проаналізувати основні поняття енергоефективності та енергозбереження, задачі, які повинні бути розв'язані при використанні енергозберігаючих заходів, розглянути енергозберігаючі технології. Проаналізувати різницю між поняттям «енергозбереження» та «енергоефективність», переваги використання енергозберігаючих технологій.

**Основні матеріали дослідження.** Енергозберігаючі технології – комплекс заходів, спрямованих на більш ефективне і раціональне використовувати енергетичні та паливні ресурси. Енергозберігаючі технології реалізуються з метою економії теплової енергії, електричної енергії, води палива, поновлюваних джерел енергії.

Енергозберігаючі технології спрямовані як на досягнення економічної ефективності, рентабельності виробництва, так і на зменшення впливу на навколишнє середовище. До основних енергозберігаючих технологій відносять використання енергозберігаючого обладнання (енергозберігаючі лампи, енергоефективні електроприлади тощо), управління електроенергією будинку за допомогою системи «розумний дім», утеплення будинку. Слід впроваджувати при відповідному науковому та економічному обґрунтуванні нові енергозберігаючі технології.

Енергозбереження, спрямоване на збереження енергії, відрізняється від енергоефективності, спрямованої на корисне витрачання енергії з максимальною ефективністю. Енергозбереження – реалізація організаційних, правових, технічних, технологічних, економічних та інших заходів, спрямованих на зменшення обсягу використовуваних енергетичних ресурсів при збереженні

відповідного корисного ефекту від їх використання (в тому числі обсягу виробленої продукції, виконаних робіт, наданих послуг). Енергозбереження та енергозберігаючі технології дозволяють вирішити проблему збереження природних ресурсів, які в свою чергу не є невичерпними. Останнім часом енергозбереження є одним з ключових питань як на рівні міжнародної, так і державної політики.

Що стосується програми енергозбереження, необхідно зауважити наступне. Програма енергозбереження є документом, який регламентує діяльність організації (установи) в галузі енергозбереження, до затверджених термінами реалізації енергозберігаючих заходів і їх фінансовим обґрунтуванням.

Якщо розглядати характеристику енергозбереження, необхідно зауважити, що не існує одного чіткого визначення, оскільки містить сукупність складових та активності, але з однією метою – заощадження паливно-енергетичних ресурсів та збереження навколишнього середовища за рахунок зменшення виробництва вуглекислого газу.

Енергетичні процеси є основою практично всіх технологічних процесів, а обсяг шкідливих викидів майже пропорційний до величини використаних енергоресурсів. При спалюванні природного газу в атмосферу викидається діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$  і оксиди азоту  $\text{N}_x\text{O}_y$ . Величина викидів в атмосферу при виробленні 1 тис. кВт год електроенергії становить [9, с. 82]:

- викиди твердих частинок – 4,4 кг / тис. кВт год.;
- оксиду вуглецю  $\text{CO}_2$  – 0,5 кг / тис. кВт год.;
- оксидів азоту  $\text{N}_x\text{O}_y$  – 2,2 кг / тис. кВт год.;
- оксидів сірки  $\text{SO}_x$  – 9,9 кг / тис. кВт год.

Існує декілька визначень понять «енергозбереження», «енергетична ефективність».

Енергозбереження – це будь-яка активність, спрямована на зменшення обсягу використання енергетичних ресурсів без шкоди для основної функції їхнього застосування.

Основні загальні принципи енергозбереження:

- використання альтернативних відновлюваних джерел енергії,
- використання вторинних енергетичних ресурсів,
- застосування неенергоємних технологій та обладнання,
- вживання заходів щодо раціонального використання наявних енергоресурсів,
- проведення оцінки економічної доцільності застосування будь-яких енергозберігаючих технологій і рішень,

– підвищення ефективності електростанцій, що споживають різні види енергоносіїв.

Мета енергозбереження визначається як підвищення енергоефективності у всій країні, у всіх її містах та поселеннях, у всіх галузях, для розвитку економіки країни та покращення стану екологічної ситуації. Необхідно визначити ті заходи енергозбереження, які в свою чергу допоможуть зменшити витрати паливно-енергетичних ресурсів, зменшать шкідливі викиди до атмосфери, оскільки питання екології є одним із найважливіших задач в процесі енергозбереження. Необхідно збільшити рівень ефективності використання електричної енергії за рахунок зменшення впливу людської діяльності на оточуюче середовище. Це є частиною енергозберігаючих технологій.

Одним із напрямів підвищення енергоефективності промислових підприємств є застосування інтелектуальних інформаційно-управляючих технологій і систем. Основною задачею таких технологій і систем є об'єднання інтегрованих автоматизованих систем управління підприємств у єдину інформаційну систему управління енергоефективністю [9, с. 28].

Оскільки енергозбереження має на меті зменшення рівня використання паливно-енергетичних ресурсів, але при цьому не повинно бути зменшено обсяги електропостачання та, як результат, зменшення вироблення продукції, то енергоефективність можна охарактеризувати як сукупність різноманітних заходів, серед яких правові, організаційні, технічні та економічні. Всі ці заходи повинні сприяти досягненню мети.

Останнім часом тема енергоефективності у будинках розглядається на рівні міжнародної та державної політики. Щодня обговорюються питання щодо обмеженості природних ресурсів, змін у кліматі та інших проблем. Раціональне використання енергоресурсів можна досягти лише шляхом комплексного застосування передових енергозберігаючих технологій та впровадження заходів організаційного характеру, спрямованих на енергозбереження. Постійне зростання цін та тарифів на енергоресурси прямим чином відображається у виробничому процесі будь-якого підприємства. Вирішення цієї проблеми бачиться в одному – необхідність економити енергію та проводити заходи, що сприяють цьому. Потрібен комплексний підхід, який враховує, що рівень енергетичної ефективності будівлі залежить від архітектурно-планувальних рішень, компонування будівлі, особливостей природно-кліматичних впливів, режиму роботи систем опалення та

кондиціонування, рівня автоматизації систем підтримки мікроклімату.

Аналізуючи поняття енергоефективності, необхідно зауважити, що це сукупність складових позитивного ефекту від застосування паливно-енергетичних ресурсів. Тобто, необхідно використовувати електричну енергію таким чином, щоб зменшення її кількості змогло забезпечити відповідний ефект у повному обсязі. Це стосується технологічних процесів на підприємстві та забезпечення електроенергією споживачів.

Енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності є цілеспрямованою політикою держави, ці процеси мають під собою цілу низку економічних причин.

Однією з яких необхідно відмітити – поступове реформування електроенергетичної галузі, збільшення вартості комунальних послуг, зменшення обсягу паливно-енергетичних ресурсів. Існують інші причини – зменшення швидкості розвитку виробничих процесів, зменшення рівня економічного зростання, труднощі із виробництвом електричної енергії необхідної кількості та відповідної якості, яку потребують споживачі.

Всі вище згадані явища зумовили досить конкретну задачу – вкласти чималі кошти для побудови нових енергетичних потужностей або використовувати жорсткі обмеження витрати паливно-енергетичних ресурсів, тобто застосовувати енергозберігаючі технології.

Отже, таким чином, енергозбереження є досить актуальною задачею. Основна увага при розробці програм енергозбереження приділяється вибору переліку та послідовності заходів по енергозбереженню, забезпечення досягнення показників, які дозволяють вирішити поставлені раніше задачі.

Енергетична сфера будь-якої держави є ресурсоємною галуззю по споживанню первинних енергетичних ресурсів та по фінансовим показникам. Згідно міжнародній статистиці, до 40% валового національного продукту тієї чи іншої держави безпосередньо пов'язано із видобуванням, переробкою та споживанням паливно-енергетичних ресурсів. Для того, щоб задовольнити зростаючі екологічні вимоги, витрати паливно-енергетичних ресурсів в майбутньому будуть збільшуватися.

Процес енергоефективності має ряд значних переваг, серед яких можна виділити наступні:

- Збереження частини природних невідновлювальних енергетичних ресурсів для майбутнього;
- Поліпшення екологічної обстановки;

- Стимуляція економічного розвитку, підвищення конкурентоспроможності продукції, що випускається, отримання додаткових доходів від експорту паливно-енергетичних ресурсів;

- Зменшення рівня екологічної небезпеки;
- Зменшення навантаження місцевих бюджетів.

Тривалість дії проведених енергозберігаючих заходів залежать від багатьох факторів, результат можна отримати не одразу ж.

**Висновки.** Тема енергозберігаючих заходів давно є актуальною та продовжує набувати цієї актуальності досить швидкими темпами. Аналізуючи європейський підхід до енергозбереження, можна зауважити, що цей процес давно є невід'ємною частиною та культурою життя.

Що стосується житлового-комунального сектору, необхідно зауважити, що послуги, які надаються, мають нерівномірний характер, зокрема це пов'язано із сезонністю. А, отже, маємо максимальний період споживання паливно-енергетичних ресурсів у визначеному секторі. Для цього необхідно своєчасне створення запасів енергетичних ресурсів.

Економія паливно-енергетичних ресурсів, активне впровадження енергозберігаючих заходів на промислових підприємствах та у побуті, зменшення викидів вуглекисню є першочерговим завданням енергозбереження. За останні роки для підтримки цієї програми було залучено Європейські країни, які мають на меті допомогу та більше поширення політики енергозбереження. Зокрема, Німеччина вже давно є рівноправним партнером у багатьох спільних проєктах, які стосуються енергозбереження.

Приймаючи до уваги природно-екологічні та економічні чинники енергоефективність стає важливим критерієм функціонування енергетичного ринку. Він охоплює такі складові: енергозбереження, енергодостатність, універсальність, енергоприйнятність, безперервність і стійкість [9, с. 21].

Стаття присвячена аналізу проблем енергозбереження, енергоефективності та їх активному втіленню, зокрема, у побуті.

Аналіз енергоефективності зарубіжних країн свідчить про те, що для використання ефективної моделі енергозаощадження можна застосовувати різні методи. Основною метою таких заходів має бути мотивація фінансової незалежності та енергоощадливості природних ресурсів [9, с. 26].

Отже, важливість та актуальність даної теми не підлягає сумніву. В Україні політика

енергозбереження займає все більше впевнене місце та є однією з важливих завдань економічного розвитку. Застосування енергозберігаючих технологій є шляхом розвитку енергетичної галузі країни, що в свою чергу може бути поштовхом для зростання економіки.

#### Список літератури:

1. Концепція національної екологічної політики України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 жовтня 2007 р.
2. Мельникова О.В., Праховник А.В., Даг Арне Хойстад, Іншеков Є.М., Дешко В.І., Конеченков А.О. Енергозбереження. Посібник з раціонального використання ресурсів та енергії для учнів загальноосвітньої школи. Видання друге виправлене та доповнене, Київ, 2004. 104 с.
3. Щербина О.М. Енергія для всіх: технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії. Вид. 4-е, допов. і перероб. Ужгород : Вид-во В. Падяка, 2007. 340 с.
4. Паливно-енергетичний комплекс України в контексті глобальних енергетичних перетворень. Київ : Українські енциклопедичні знання, 2004. 408 с. URL: <https://formula.kr.ua/osnovi-energoefektivnosti/vykorystani-dzherela-informatsii-literatura.html>
5. Зінченко А., І. Бондарчук І., Хоменко В. Біла книга: Розподілені енергетичні ресурси та технології. Створення передумов для їх оптимального використання. Програма розвитку ООН в Україні.
6. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://sae.gov.ua/uk/consumers/energoberezhennya-ukrainy>
7. Положення про державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://sae.gov.ua/uk/about/polozhennya-derzhenerhoefektivnosti-ukrainy>
8. Краснянський М.Ю. Енергозбереження : навчальний посібник. К. : Видавничий дім «Кондор», 2018. 136 с.
9. Організаційно-економічний механізм енергозбереження : монографія / Ю.В. Дзядикович, В.Я. Брич, В.В. Дзеджула, Р.Б. Гевко, та ін. Тернопіль : ТНЕУ, 2018. 154 с. ISBN 978-966-654-497-4

#### Oliinyk Yu.S. ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS

*Saving fuel and energy resources is an urgent task at the level of the State as a whole and at the level of individual industrial enterprises or household premises. This task is not only not lost in time, but is becoming more and more important as all consumers of electric energy need reliable and uninterrupted supply of adequate quality and quantity. The above-mentioned electricity consumers are quite energy-intensive. In turn, rising costs of energy and utilities dictate the use of energy conservation measures. It is intended to introduce energy-saving measures that will reduce the consumption of fuel and energy resources and increase the level of monetary savings. The rapid development of industry and the increase in electricity consumption, together with abundant fuel and energy resources, have made energy savings a top priority. Since then, energy conservation and energy efficiency have become increasingly prominent on the list of important challenges.*

*The article focuses on energy conservation and energy efficiency. In particular, the concepts of energy efficiency and energy saving, the main objectives and goals of energy saving, the analysis of energy saving measures, the advantages of introducing energy saving measures are examined. The concept of energy efficiency refers to the more efficient use of electricity, that is, while reducing the consumption of electric energy on the one hand, maintaining or even increasing the efficiency of its use.*

*Energy-saving activities in residential and administrative facilities are also being extended to garment companies. One of the most important areas is the improvement of energy efficiency through the reconstruction of the ventilation system, hot water supply and heating, roof heating, facades, window replacement, etc. Consequently, Planning and further use of energy saving measures is an important aspect of energy saving and, as a consequence, a factor in the economic growth of the State.*

**Key words:** energy efficiency, energy saving, fuel and energy resources, energy saving program, renewable energy sources.

**Сірий О.А.**

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

**Кобилянська О.О.**

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

## CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ СУМІШІ МЕТАН-ВОДЕНЬ В СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ ПОЛУМ'Я

*Розвиток водневих технологій індустріально розвиненими країнами світу та поступове залучення їх в енергетичну галузь виокремлює цей напрям як перспективний у контексті поступового переходу до безвуглецевих технологій. Використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливоспалюючим устаткуванням може бути першим кроком на шляху забезпечення діючих та майбутніх екологічних норм. Слід зазначити, що визначальним фактором щодо емісії шкідливих речовин є технологія спалювання. В роботі авторами розглянуто головні етапи побудови CFD-моделі процесу згоряння суміші палив метан-водень в струменево-нішевій системі (СНС) стабілізації та спалювання палива. Наведено методику CFD-моделювання в програмному середовищі Ansys Fluent. Проведено аналіз отриманих результатів, а саме вплив геометричних та режимних параметрів стабілізатору на процес горіння при різних співвідношеннях концентрацій компонентів метан-водень. Показано вплив додавання водню на далекобійність та швидкість витікання струменів палива, необхідного для забезпечення робочого режиму пальника. За результатами математичного моделювання проаналізовано закономірності утворення оксидів азоту при зміні геометричних характеристик паливоподачі. Також визначено вплив зміни вмісту водню в об'ємі пальної суміші з метаном на концентрації NOx в продуктах спалювання. Встановлені закономірності гідродинаміки потоку в струменево-нішевій системі при варіюванні гідродинамічного параметра  $q$  для неізотермічної течії. Представлено залежності для розрахунку емпіричного коефіцієнту, який трактує глибину проникнення струменів суміші метан-водень у потік окисника, що набігає. Надані рекомендації щодо визначення раціональних конструктивних параметрів паливорозподілу СНС.*

**Ключові слова:** метано-воднева суміш, CFD-модель, ANSYS Fluent, струменево-нішева система, розподіл температур.

**Постановка проблеми.** В останні роки відбувається критичне загострення глобальних екологічних проблем, таких як кислотні опади та зміна клімату. Україна серед європейських держав має найвищий інтегральний показник негативних техногенних навантажень на навколишнє природне середовище практично на всій своїй території. Відомо, що одним з основних джерел забруднення оточуючого повітря є енергетика. І, хоча енергію можна одержувати більш екологічними шляхами, використовуючи відновлювані джерела (сонце, вітер, термальні води, деревина та відходи сільськогосподарського виробництва), необхідно усвідомлювати, що способу отримання енергії, який би зовсім не шкодив довкіллю, не існує.

Слідом за провідними європейськими країнами, які орієнтують енергетику у напрямі «без-

вуглецевих» технологій, Україна також тримає курс на зменшення шкідливих викидів в атмосферу [НПСВ 1]. Станом на 2021 рік виробництво електроенергії відновлюваними джерелами становить 9% [2]. Наразі деякі країни віддають перевагу водневим технологіям, як альтернативному виду палива. Одним з перспективних напрямів застосування водню є використання його в технологіях спалювання у якості домішки до основного палива з ціллю часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового призначення [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наразі, лідером у використанні водню є Велика Британія, де реалізовано проект, за яким сумішшю природний газ – водень будуть опалюватись житлові будинки та учбові заклади. Об'єм водню

в суміші складатиме 20% [3]. Також є досвід у використанні суміші метан-водень з вмістом  $H_2$  від 20% до 48%. Відомо, що Європейські країни вже набули досвіду використання домішок водню як процесу декарбонізації продуктів згоряння. Так, при проведенні теоретичних розрахунків процесу горіння природного газу з вмістом метану 96%, де в якості окисника обрано повітря, було встановлено, що у продуктах реакції зменшується кількість діоксиду вуглецю  $CO_2$  майже на 40% при співрозмірному вмісті водню у суміші. Загальне зниження продуктів спалювання становить у середньому 30%. Відбувається деяке підвищення теоретичної температури горіння, орієнтовно на 30 °С. Слід зазначити, що заміщення газу воднем призводить до зменшення теплоти згоряння. Так при 40,01%,  $Q_n^p$  становить 26,38 МДж/кг, що менше на 27% у порівнянні з природним газом без додавання  $H_2$  [4].

Відомо, що теплотворна спроможність водню – становить 10,8 МДж/м<sup>3</sup>. Енергетична цінність водню у 3,3 рази менша, ніж метану та у 3,2 рази, ніж у природного газу [4]. У процесі застосування водню у котельних агрегатах необхідно дотримуватись особливих вимог техніки безпеки через його високу запалювальну здатність та велику швидкість розповсюдження полум'я. Треба зважати на високу проникаючу здатність водню, що зумовлює необхідність використання спеціальних матеріалів для його транспортування та зберігання.

До особливостей водню можна віднести високу дифузійну проникність та високі температури і швидкості горіння у порівнянні з природним газом, що дозволяє покращити сталість горіння факелу при високих надлишках повітря, тобто розширити межі «бідного» зриву полум'я. Але, при додаванні водню відбувається підвищення максимальних температур горіння, що негативно відзначиться на емісії шкідливих окислів азоту і це обов'язково також потрібно враховувати при

проведенні еколого-теплотехнічної модернізації газоспалюючого устаткування [5].

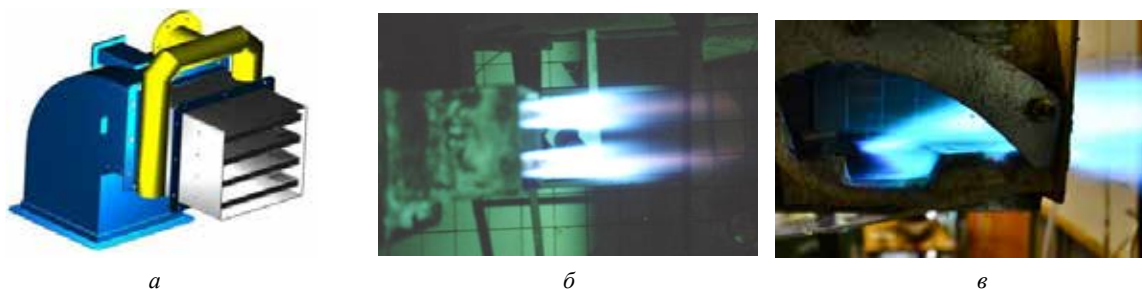
За результатами літературних джерел [4–6] можна прийти до висновку, що наразі доцільне застосування не тільки «блакитного» водню, який отримується паровою конверсією з метану, але й впровадження, так званого, «зеленого» водню, який утворюється при електролізі води за рахунок використання надлишкової енергії сонця або вітру. А додавання водню впливає не лише на зниження вуглецю, а й на ефективність паливоспалюючого обладнання.

Також, слід зазначити, що за результатами проведення модернізації існуючого обладнання доведено, що на ефективність зниження емісії окисидів азоту суттєвий вплив має технологія спалювання палива. З точки зору канонічних принципів мінімізації концентрацій  $NO_x$  таких як: попереднє сумішеутворення, стадійне горіння та прямоочна аеродинамічна схема течії окиснювача, перспективними розглядаються пальникові пристрої розроблені у КПІ ім. Ігоря Сікорського. Однією з таких перспективних розробок є Струменево-нішева технологія спалювання (СНТ) (рис. 1) [5].

Основні принципи, що покладені в основу технології, наступні: раціональний розподіл палива в потоці окисника; стійка регульована структура течії палива, окисника та продуктів згоряння; саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу. Станом на 2022 рік на базі СНТ напрацьовано значний досвід енергоекологічної модернізації котельного обладнання потужністю 0,5...125 МВт [5].

Подальший розвиток досліджуваної технології пов'язаний з можливістю використання паливних газів альтернативних природному газу, тому наразі актуальним є дослідження емісійних показників струменево-нішевої системи, де в якості палива використовується суміш метан-водень.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розширення уявлень про особливості процесів спа-



**Рис. 1. Струменево-нішева технологія спалювання палива:**  
пальник (а), відкритий газовий факел (б), горіння в СНС (в)

лювання суміші метан-водень в струменево-ніше- вий системі стабілізації та спалювання палива шляхом CFD-моделювання досліджуваного явища в програмному середовищі Ansys Fluent. Основною задачею роботи є оцінка геометричних параметрів паливорозподілу СНС при додаванні до природного газу водню з точки зору реаліза- ції процесу сталого горіння та забезпечення міні- мально можливого рівня емісії шкідливих оксидів азоту. Виконання попередніх розрахунків з ціллю оцінки можливих режимів роботи пальників на базі СНС. Розробка рекомендацій щодо вибору геометричних і режимних параметрів при підго- товці до проведення експериментальних дослі- джень на вогневому лабораторному стенді.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для дослідження процесу спалювання суміші авторами була розроблена CFD-модель процесу, який відбу- вається в СНС. В загальному випадку вона містить геометричну модель СНС, створену на її основі скінченно-елементну модель із граничними умо- вами й математичним описом розрахункового про- цесу, реалізованого засобами ANSYS-Fluent.

Слід зазначити, що процес горіння у паль- никах СНТ класифікується як мікрофакельний, турбулентний процес горіння попередньо непе- ремішаної суміші. Мікрофакельне горіння наразі зустрічається в багатьох технологіях спалювання палива. Цей тип згоряння характеризується склад- ним математичним описом [7]. Турбулентний потік реагуючої суміші описується системою диференціальних рівнянь: руху, нерозривності і переносу і-го компонента суміші [8]. Розв'язок виконуватиметься чисельними методами в про- грамному середовищі Ansys-Fluent.

Емісія  $NO_x$  моделювалася з використанням стандартної методики прогнозування термічних

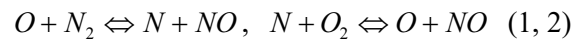
$$\frac{d[NO]}{dt} = \kappa_{f,1}[O][N_2] + \kappa_{f,2}[N][O_2] + \kappa_{f,3}[N][OH] - \kappa_{r,1}[NO][N] - \kappa_{r,2}[NO][O] - \kappa_{r,3}[NO][H] \quad (4),$$

де всі концентрації мають розмірність моль/м<sup>3</sup>.

Кінетика швидкості термічного утворення  $NO_x$  набагато повільніша, ніж швидкість основ- ного окислення вуглеводнів, і тому більша частина теплових  $NO_x$  утворюється після завершення згоряння. Тому термічний процес утворення  $NO_x$  часто можна відокремити від основного меха- нізму реакції горіння, а швидкість утворення  $NO_x$  можна розрахувати, припустивши рівновагу реак- цій горіння. Використовуючи цей підхід, розраху- нок швидкості теплового утворення  $NO_x$  значно спрощується.

Таким чином, при моделюванні було враховано тільки механізм Зельдовича [10]. Інші механізми

оксидів азоту засобами програмного комплексу Ansys Fluent. Так, утворення термічних  $NO_x$  визна- чалися набором залежних від температури хіміч- них реакцій, відомих як розширений механізм Зельдовича. Основні реакції утворення термічних  $NO_x$  з молекулярного азоту, є такими:



З рівняння (1) видно, що швидкість утворення  $NO$  буде зростати зі збільшенням концентрації кисню. Також термічне утворення  $NO$  сильно залежить від температури, але не залежить від типу палива. Насправді, виходячи з граничної швидкості, швидкість термального утворення  $NO_x$  подвоюється з кожними 90К підвищення тем- ператури понад 2200 К.

Третя реакція сприяє утворенню теплових  $NO_x$ , особливо в умовах, близьких до стехіометричних, і в сумішах, багатих паливом:



Константи швидкості цих реакцій які викорис- товуються в моделі  $NO_x$ , були обрані на основі оцінки Хенсона і Саліміана [9]), та мають вигляд:

$$\kappa_{f,1} = 1.8 \cdot 10^8 e^{-38370/T} \quad \kappa_{f,2} = 1.8 \cdot 10^4 e^{-4680/T}$$

$$\kappa_{f,3} = 7.1 \cdot 10^7 e^{-450/T}$$

$$\kappa_{r,1} = 3.8 \cdot 10^7 e^{-425/T} \quad \kappa_{r,2} = 3.81 \cdot 10^3 e^{-20820/T}$$

$$\kappa_{r,3} = 1.7 \cdot 10^8 e^{-24560/T}$$

У наведених вище виразах  $\kappa_{f,1}$ ,  $\kappa_{f,2}$ , та  $\kappa_{f,3}$  – константи швидкості прямих реакцій (1-3), від- повідно,  $\kappa_{r,1}$ ,  $\kappa_{r,2}$ , та  $\kappa_{r,3}$  – відповідні зворотні константи швидкості. Усі ці константи швидкості мають розмірність м<sup>3</sup>/моль-с.

Чиста швидкість утворення  $NO$  в результаті реакцій у рівнянні (13) визначається як:

у розрахунку не застосовувалися з міркувань зна- чного превалювання саме термічного механізму (наявність водню збільшує температури горіння) та спрощення математичної моделі процесу. На рис. 2 зображено 3D-модель струменево-нішевого стабілізатора полум'я, яка є об'єктом дослідження і вогнетривкої футерованої ділянки.

За алгоритм розрахунку був обраний неявний алгоритм встановлення (Pressure Based Implicit). Розрахунок робився в стаціонарній постановці (Steady). Це припущення зроблено задля ско- рочення ресурсів і часу, що витрачаються на розв'язок. За обчислювальну модель була обрана Realisable k-ε модель турбулентності.



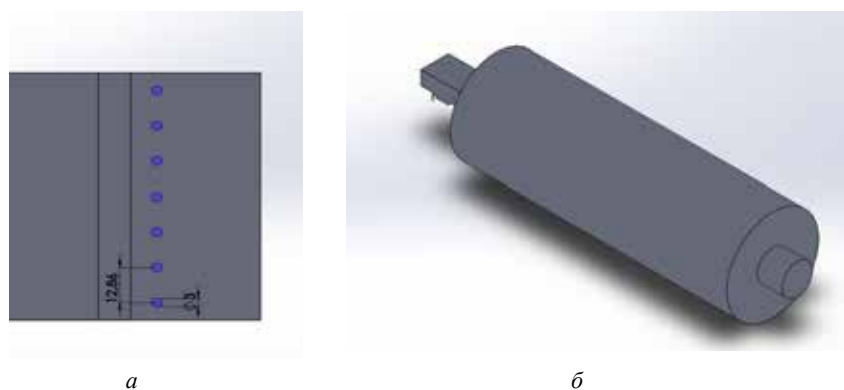


Рис. 2. 3D модель розрахункової області (а) струменево-нішевого стабілізатора полум'я (б)

У якості базової хімічної реакції процесу обрано двостадійне реагування метану і водню з киснем, де у продуктах реакції утворюється вуглекислий газ і вода у вигляді пари. Теплофізичні параметри кожного елемента реакції розраховані з бази Fluent. Процес горіння моделювався на базі підходу Eddy dissipation. В якості граничних умов на непроникних стінках задавалося умова рівності нулю всіх компонентів вектора швидкості. Температура стінки також задавалась рівною нулю. На вході в розрахункову область задавалась масова витрата і температура (Massflow inlet), на виході – статичний тиск (Pressure outlet). З метою визначення впливу на процес горіння при обчисленні різних співвідношень концентрацій паливних компонентів за допомогою CFD-моделі змінювався коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ .

Для візуалізації результатів досліджень процесу горіння в СНС використовувалися значення середніх швидкостей і температур суміші та розподілу окислів азоту. Слід зазначити, що у струменево-нішевій системі відбувається сумішеутворення та стабілізація процесу горіння, догорання палива завершується у жаровій трубці. Процес горіння характеризується формуванням просторово розвиненого і протяжного факела, де співвідношення витрат палива і окислювача значною мірою впливають на його довжину і конфігурацію. Для порівняння температурного поля продуктів згорання проведено чисельні розрахунки для чистого метану та метано-водневої суміші з об'ємним вмістом водню 10 %, 25 %, 50 %.

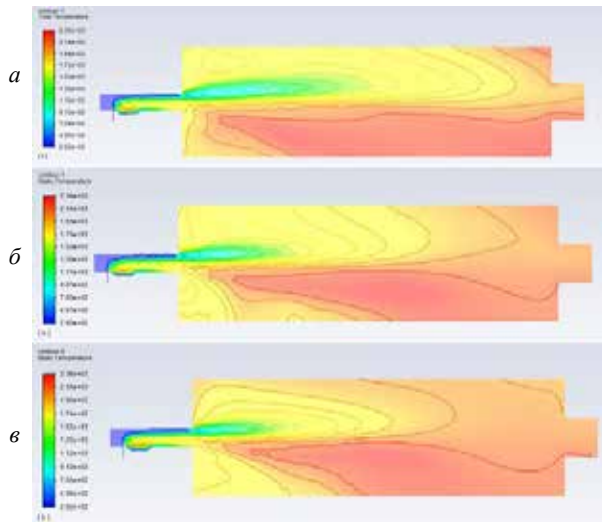
На рис. 3 зображено розподіл температур для різних співвідношень суміші метан-водень та для чистого метану при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha=1,1$ . З результатів видно, що як для випадків з чистим метаном, так і для суміші метан-водень процес горіння починається безпосередньо в нішевій порожнині, що забезпечує стабіліза-

цію факелу не залежно від складу суміші. Також з наведених епюр видно, що водень сприяє певному підвищенню рівня температур у так званій транзитній зоні, тобто області де превалює потік окисника. Фактично, факел розповсюджується у найбільш «захоплену зону» футерованої ділянки, очевидно за рахунок високої реакційності водню. З тієї ж причини високої дифузійності водню, ділянка під факелом у розширеній частині футерованого каналу навпаки не заповнюється високонагрітими продуктами спалювання які утворюються в основному у зоні над факелом і до моменту потрапляння у зазначену зону значним чином заохолоджуються та майже не реагують. Розглянута картина вказує на значні відмінності у процесах спалювання розглянутих сумішей, тому для забезпечення сталого горіння можливо виникне необхідність певної корекції системи паливорозподілу.

При детальному розгляді гідродинамічної картини в зоні стабілізації факелу [4], виявилось, що картина в нішевій порожнині певним чином відрізняється від випадку спалювання чистого метану. Так, для випадку метано-водневої суміші стабілізація та горіння факелу, окрім горіння у нішевій порожнині у значній мірі забезпечується струминним «екраном» пальної суміші, і відбувається в області над нішею та частково розвивається далі у потоці реагуючої суміші. Така особливість пояснюється деяким збільшенням далекобійності струменів палива для забезпечення відповідного робочого режиму системи і визначається гідродинамічним параметром  $q$ , який являє собою відношення динамічних напорів палива і окисника [12]:

$$q = \left( \rho_e \cdot W_e^2 \right) / \left( \rho_n \cdot W_n^2 \right), \quad (5)$$

де  $\rho_r$ ,  $\rho_n$  – густина пального газу і повітря відповідно,  $W_r$  і  $W_n$  – швидкість газу повітря відповідно.



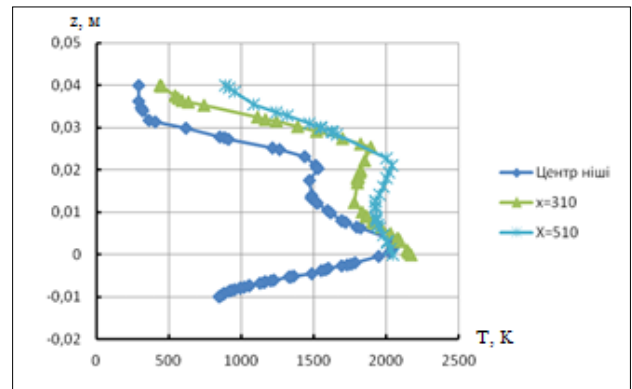
**Рис. 3. Порівняння температурного поля продуктів згоряння при  $\alpha = 1,1$ ,  $s/d = 4,3$ ,  $d = 3,0$  мм для співвідношення компонентів метан/водень а) 0/100%, б) 25%/75%, в) 50%/50%**

За розрахунками, значення гідродинамічного параметру для суміші паливних газів  $q_{\text{сум}}$  становить 34, а для чистого метану –  $q_{\text{мет}} = 28$ . Таким чином, виникає необхідність збільшення швидкості витікання струменів палива необхідної для забезпечення робочого режиму пальника. Наведені значення параметрів  $q$  характерні при надлишку повітря 1,1, і в результаті збільшення відсотку вмісту водню збільшується опір потокові повітря, який набігає на стабілізатор (це тобто домашнє завдання для наступної публікації – порахувати  $\xi$  гідравлічний опір потоку в залежності від  $q$ , висоти каналу, і вмісту водню).

Для випадку  $\alpha = 5,0$  зменшення далекобійності струменів палива призводить до збільшення транзиту повітря в області над горінням. Поля температур наочно демонструють різницю гідродинамічної картини потоку реагуючої суміші в області розвитку струменів над нішевою порожниною, що пояснюється збільшеною витратою суміші у порівнянні з чистим метановим паливом для забезпечення  $\alpha = 5,0$ . Так, значення гідродинамічного параметра для суміші  $q_{\text{сум}}$  становить 1,66, у той час для чистого метану –  $q_{\text{мет}} = 1,35$ .

В цілому для усіх режимів подачі палива ( $\alpha = 1,1$ ,  $\alpha = 1,5$ ,  $\alpha = 5,0$ ) і повітря забезпечувалась схожа тенденція до розподілу температур (середня температура у дослідній ділянці зростала при збільшенні відсотку водню).

На рисунку 4 представлено профілі температур у поперечних перетинах по довжині каналу, що орієнтовані по осі газоподавального отвору.



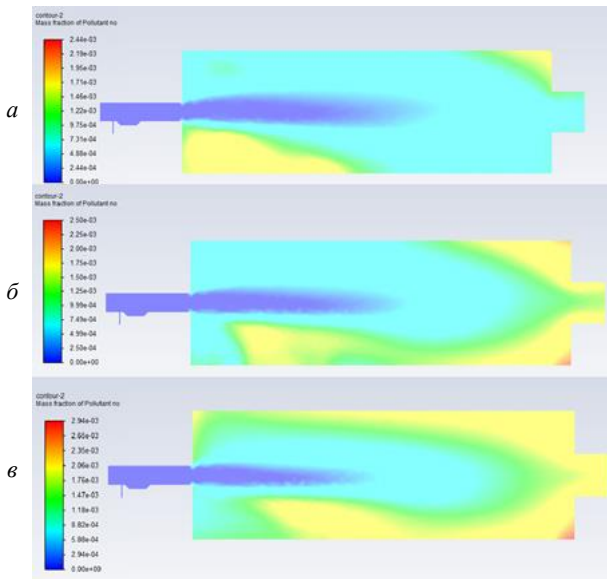
**Рис. 4. Значення температур факелу метано-водневої суміші при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha=1,1$  у різних поперечних перетинах ділянки горіння**

Графіки характеризуються екстремумами, що являють собою «піки» максимумів температур у корні факелу. У перетині, що відповідає центру ніші, таких піків два, нижчий характеризує профіль температур у зоні стабілізації факелу, а вищий (менший за абсолютним значенням) окреслює картину розвитку струменів палива у потоці окисника, що набігає перпендикулярно. Профілі на відстані 310 та 510 мм від початку досліджуваної ділянки повторюють загальну картину розвитку температурного поля і ілюструють положення осередку полум'я у факелі, що знаходиться приблизно по центру (у відношенні до вертикальної осі) каналу.

З [12] відомо про «термічний» характер розповсюдження окислів азоту, тобто максимум викидів спостерігатиметься в зонах із високими температурами.

З рисунку 5 видно, що число локальних точок утворення окислів азоту дещо підвищується з додаванням водню, внаслідок підвищення температур, що відповідає теоретичним основам формування термічних  $\text{NO}_x$ .

Так, при зміні домішки водню від 10% до 25% максимальне локальне значення емісії  $\text{NO}_x$  збільшується на 10%, а при зміні домішки з 25% до 50% кількість викидів  $\text{NO}_x$  збільшується на 27%. Характер розподілу окислів азоту здебільшого формується гідродинамікою потоку пального та окисника у дослідній ділянці. З результатів видно, що вільний кисень повітря безпосередньо починає взаємодіяти з азотом по мірі протікання процесу і здебільшого зміщується до хвостової частини футерованої ділянки. Звертає на себе увагу зона з підвищеною концентрацією  $\text{NO}_x$  в області під факелом, що пояснюється наявністю масштабної циркуляційної зони куди потрапляють



**Рис. 5. Поле концентрації оксидів азоту в центральному перетині дослідної ділянки при  $\alpha=1,1$ ,  $s/d=4,3$ ,  $d=3,0$  мм для співвідношення компонентів метан/водень**  
а) 0 / 100 %, б) 25 % / 75 %, в) 50 % / 50 %

високотемпературні продукти реакції. Вцілому, розрахунково отримані розподіли токсичних  $\text{NO}_x$  корелюються з результатами моделювання температурних полів і підтверджують превалюючу емісію термічних оксидів азоту.

Слід зазначити, що разом з режимними параметрами, геометричні параметри (у тому числі наявність нішевої порожнини) також мають вплив, як на гідродинамічну картину течії реагуючої суміші, так і на емісію викидів.

З ціллю надання рекомендацій щодо конструктивних особливостей пальникової системи в роботі проведено аналіз далекобійності неізотермічного струменю в перпендикулярному потоці повітря, що набігає, за наявності процесу горіння. Далекобійність визначалася шляхом аналізу профілів горизонтальних компонент швидкості у вертикальній осі каналу на різних відстанях від устя отворів для подачі газу. Так, наявність зони зворотних струмів в області нішевої порожнини, зокрема для ситуації з реагуванням метану була доведена присутністю як поступального руху так і зворотнього (окрім додатних значень швидкості є від'ємні). Виродження вихрової структури під струменями палива відбувалась при збільшенні витрати палива у наведеному діапазоні значень гідродинамічного параметру (більше 1,35), що характерно в ситуації спалювання суміші. У збідненій зоні суміші чітко проявлявся максимум горизонтальної компоненти швидкості, що відповідав розвитку системи струменів у потоці

окисника, а для метану вплив струмневої подачі майже не прослідковувався. Отже, з отриманих результатів можна зробити висновок, що існує певний вплив від різниці швидкості витікання палива з колектору газорозподілу (для досліджуваних умов – 8,0 м/с для метану і 10,4 м/с для його суміші з воднем), та значним пришвидшенням проходження реакції окиснення за рахунок реагування більш реакційно здатного водню.

Відомо, що глибина проникнення струменів трактується параметром далекобійності [13], який для ізотермічного витікання визначається як відстань у діаметрах струменя по нормалі від отвору газоподачі до точки на осі струменя де проекція на горизонтальну вісь буде не менше 5 % від швидкості в усті струменя. У ранніх роботах для визначення далекобійності струменів запропонована критеріальна залежність вигляду [5]:

$$D = k_c \cdot \sqrt{q} \cdot (L/H)^{0,13}, \quad (6)$$

де  $k_c$  – емпіричний коефіцієнт,  $q$  – гідродинамічний параметр,  $L$  і  $H$  – довжина і висота нішевої порожнини відповідно.

За результатами роботи пропонується ідентифікувати тип палива, тому для метану та його суміші з воднем запропоновано різні емпіричні коефіцієнти в залежності від надлишку повітря в системі.

Таким чином, для практичного застосування отриманих результатів слід використовувати показникову залежність при визначенні геометричних параметрів робочого каналу пального для природного газу. У разі ж присутності домішок водню пропонується наступна залежність:

$$k_c = 2,0 \cdot \alpha^{-0,38} \cdot (0,65 + C_{H_2} / 100)^{0,75} \quad (7)$$

де  $C_{H_2}$  – об'ємна концентрація водню в пальній суміші, %. В даній залежності присутність коефіцієнту надлишку повітря пов'язана не тільки з режимом роботи пального, але й призначенням, тобто розрахунки пального для котельного устаткування проводяться в діапазоні 1,05...1,15, а для обладнання, що працює в зоні збіднених сумішей – підбирається згідно вимог технологічного процесу [14].

Важливим параметром паливорозподілу при проектуванні газопального обладнання є вибір кроку розташування газорозподільчих отворів  $S$ . Найчастіше цей параметр пов'язують з діаметрами отворів і називають відносним кроком:  $\bar{S} = S/d$ . Рекомендовані значення для умов спалювання природного газу становлять:  $\bar{S} = 3,0...4,0$ . Зменшення відносного кроку до зна-

чень менше 2,0 і більше 5,0 не рекомендовано у зв'язку з суттєвим погіршенням автотельності процесів сумішоутворення в зоні стабілізації факелу, що призводить до суттєвого звуження діапазону сталого горіння. Слід зазначити, що при спалюванні інших газів також бажано дотримуватися вказаного діапазону значень кроку розташування отворів, оскільки гідродинаміка взаємодії потоку окисника зі струменями палива відіграє важливу роль в процесі стабілізації горіння. Варіювання відносного кроку у допустимих межах розглядається одним зі способів забезпечення стехіометричної суміші в області стабілізації процесу горіння.

На рисунку 6 представлено розподіл температур по осі дослідної ділянки та в ніші при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при  $\alpha=1,1$  в залежності від параметру  $s/d$ .

Як видно з наведених результатів, параметр  $s/d$  не впливає на рівень максимальних температур, їх різниця коливається в межах  $\pm 30^\circ\text{C}$ . Певна відмінність розподілу температур спостерігається в області нішевої порожнини. Видно, що при  $s/d = 2,5$  паливо повністю заповнює об'єм ніші, де і відбувається процес горіння (рис. 6 г). Стосовно інших випадків представлених на рис. 6, відбувається перебудова структури потоку, вихорова структура підіймається з ніші у зону за струмінєвим екраном палива нижче за потоком по мірі збільшення відносного кроку  $s/d$ . Схожим чином перебудовується зона горіння. Отримані результати достовірно підкреслюють фізику гід-

родинамічної картини взаємодії перпендикулярної струменевої подачі палива у потік окисника, що набігає. Так, зменшення кроку дещо зменшує далекобійність струменів за рахунок об'єднання їх пограничних шарів у спільний «струмінєвий екран». З іншого боку, збільшення кроку розташування отворів призводить до виокремлення кожного струменя, які глибше проникають у потік індивідуально, ніж спільною пеленою газу при злитті у спільну структуру.

На рисунку 7 наведено розподіл  $\text{NO}_x$  по осьовому перетину дослідної ділянки при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при  $\alpha=1,1$  при  $s/d = 4,3$ , та  $s/d = 2,5$ . Для випадку  $s/d = 2,5$  спостерігається суттєве зменшення  $\text{NO}_x$  приблизно на 40% (при тому, що за результатами розрахунків температури як для  $s/d = 4,3$ , так і для  $s/d = 2,5$  майже на одному рівні). Слід враховувати, що заміщення метану на 50% по об'єму знижує теплотворну здатність суміші на третину, максимальні ж розрахункові температури горіння при цьому навіть дещо більші. З іншого боку, зниження калорійності суміші потребує уточнення схеми паливорозподілу з точки зору забезпечення горючих концентрацій в зоні стабілізації факелу і в цілому показників автотельності при зміні витрат компонентів.

Таким чином, стосовно впливу кроку розташування отворів в СНС на процес горіння суміші метан-водень, розрахунки показують, що більш прийнятним з точки зору мінімізації емісії оксидів азоту є його зменшення в межах вказаного реко-

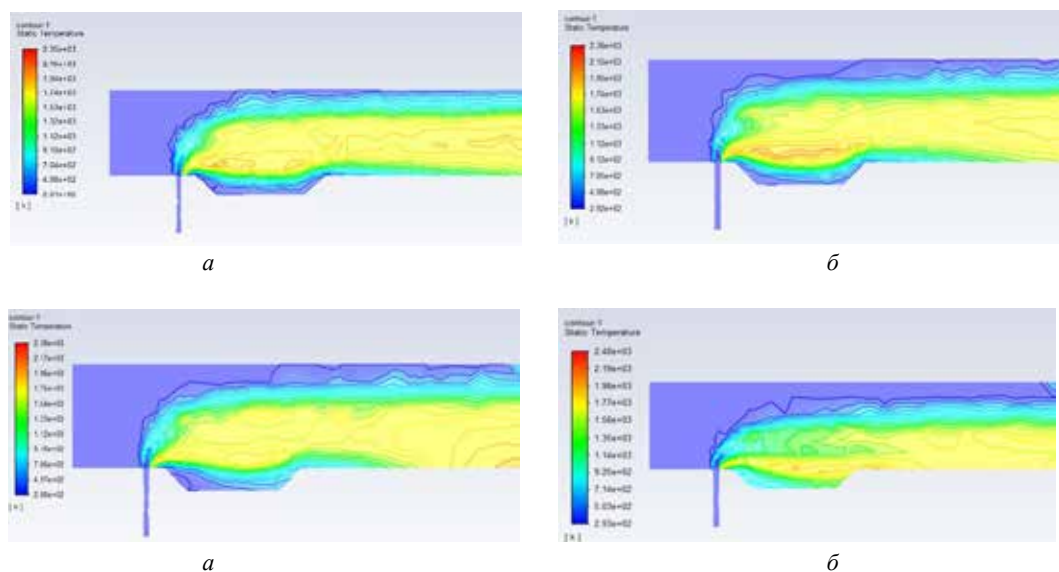


Рис. 6. Розподіл температур по осі дослідної ділянки та в ніші при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при  $\alpha=1,1$  в залежності від параметру  $s/d$ : а)  $s/d = 5,0$ , б)  $s/d = 4,3$ , в)  $s/d = 3,75$ , г)  $s/d = 2,5$

мендованого діапазону значень. Оцінка теплового балансу процесу горіння в зоні стабілізації факелу вказує також на необхідність зменшення кроку в порівнянні з рекомендованим значенням для метану. Так, при горінні збіднених сумішей слід зменшувати крок і навпаки збільшувати його – при горінні збагачених сумішей (наприклад пропан). З іншого боку, нормальна швидкість розповсюдження полум'я для водню у 5 разів більша у порівнянні з метаном ( $v_{\text{CH}_4} = 0,28$  м/с) при стехіометричних концентраціях і не може не впливати на стабілізаційні якості СНС, тому вибір параметру  $s/d$  потребує комплексної оцінки усіх робочих аспектів стабілізатора полум'я з обов'язковим експериментальним підтвердженням результатів моделювання.

### Висновки

В даній роботі на основі математичного моделювання авторами проведено комплекс досліджень процесу мікрофакельного спалювання суміші палив метан-водень у пальникових пристроях струменево-нішевого типу. Розглянуто головні етапи побудови CFD-моделі процесу згоряння паливної суміші. Наведено методику CFD-моделювання в програмному середовищі ANSYS Fluent.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що як для чистого метану, так і для суміші метан-водень, при збільшенні коефіцієнту надлишку повітря відбувається підвищення локальних температур горіння в об'ємі ніші, а отже й зменшення довжини факелу реагуючої суміші. Домішки водню збільшують швидкість витікання струменів палива та їх дальнобійність в середньому на 18%,

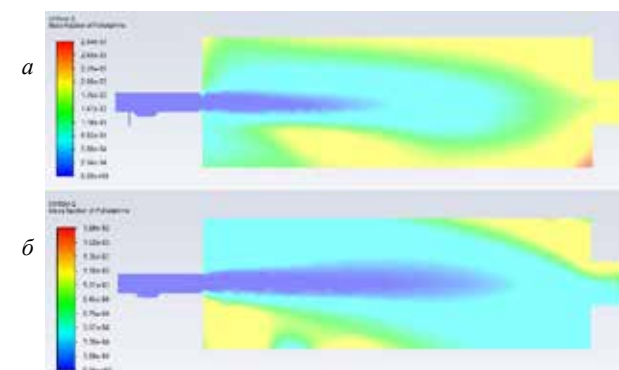


Рис. 7. Розподіл  $\text{NO}_x$  по осі дослідної ділянки при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при  $\alpha=1,1$  в залежності від параметру  $s/d$ : а) 4,3, б) 2,5

при забезпеченні робочого режиму пальника. Так, при спалюванні суміші дещо збільшується гідродинамічний показник, тому стабілізація та горіння факелу відбувається не тільки безпосередньо над нішею (як для випадку з чистим метаном), а й частково зміщується далі у потоці реагуючої суміші. За результатами роботи для метану та його суміші з воднем запропоновано емпіричні залежності для визначення параметру дальнобійності паливних струменів. З розрахунків встановлено, що додавання водню в об'ємі від  $\frac{1}{4}$  до  $\frac{1}{2}$  збільшує емісію  $\text{NO}_x$  на 27%. З огляду на отримані результати, рекомендованим діапазоном вибору відносного кроку розташування отворів з точки зору забезпечення сталості горіння і зниження викидів  $\text{NO}_x$  при горінні метановодневих сумішей  $s/d = 2,0 \dots 3,5$ .

### Список літератури:

1. НЕК «УКРЕНЕРГО». URL: [https://ua.energy/peredacha-i-yspetcheryzatsiya/zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchykh-potuzhnostej/#1538032249\\_011-abadd3b9-db7ca1e4-9e6d](https://ua.energy/peredacha-i-yspetcheryzatsiya/zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchykh-potuzhnostej/#1538032249_011-abadd3b9-db7ca1e4-9e6d) (дата звернення: 20.12.2021)
2. Сорока Б.С., П'яних К.Є., Згурський В.О., Горупа В.В., Кудрявцев В.С. Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші, як паливного газу. Нафтогазова галузь України, № 6. 2020. С. 3–14. URL: <https://www.naftogaz.com/files/journal/Journal-Naftogazova-galuz-06-2020.pdf> (дата звернення 17.05.22)
3. Спеціалізований ресурс про відновлювану енергетику в Україні та світі. URL: <https://ecotown.com.ua/news/U-Britaini-vpersherochali-oral...-Ecotown,2020>. (дата звернення 12.02.22)
4. Кривенцов О.О., Сірий О.А. Особливості горіння метано-водневих сумішей у камерах згоряння ГТД. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: праці XIX міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів (Київ, 20–23 квітня 2021 р.)*, Київ, 2021р.
5. Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження гідродинамічного стабілізатора полум'я з поперечною подачею палива. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів (Київ, 21–24 червня 2014 р.)* Київ, 2014 р. С. 101.
6. Вікіпедія: вільна енциклопедія URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Воднева\\_Енергетика](https://uk.wikipedia.org/wiki/Воднева_Енергетика)
7. Haryanto A., Fernando S., Murali N., Adhikari S. Current Status of Hydrogen Production Techniques by Steam Reforming of Ethanol. *Energy and Fuels* 2005;19:2098-2106.

8. Інституційний репозитарій ТНТУ імені Івана Пулюя. URL: [http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/22174/2/NKTNTU\\_2017\\_Dranivskyi\\_N\\_I-Hydrogen\\_accessible\\_186-187.pdf](http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/22174/2/NKTNTU_2017_Dranivskyi_N_I-Hydrogen_accessible_186-187.pdf) (дата звернення 12.04.22)

9. R. K. Hanson and S. Salimian. "Survey of Rate Constants in H/N/O Systems". In W. C. Gardiner, editor. *Combustion Chemistry*. 361. 1984.

10. М.З. Абдулин, Г.Р. Дворцин, А.М. Жученко, О.В. Доманский, С.Ф. Порхун Универсальная технология сжигания – это реальность. Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем : сб. научн. тр., М. : НИУ МЭИ, 2010. С. 29–32.

11. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / пер. с англ. Г.Л. Агафонова ; под ред. П.А. Власова. М. : Физматлит, 2003. 352 с.

12. Микулин Г.А., Любчик Г.Н., Варламов Г.Б. Эмиссионные свойства трубчатых топливосжигающих элементов интенсификации горения и стабилизации пламени. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2005, № 2.

13. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Серый О.А. Оптимизация гидротермохимических процессов – основа высокоэффективного сжигания топлива. *Единое информационное пространство*. Киев : КНУ им. Шевченка, 2013. С. 121–122.

14. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация : учебник для нач. проф. образования. 2-е изд., испр. М. : Академия, 2007. 432 с.

### **Siryi O.A., Kobylanska O.O. ANALYSIS OF CFD-MODEL OF METHANE-HYDROGEN COMBUSTION PROCESS IN A JET-NICHE GAS BURNER**

*The development of hydrogen technologies by the industrialized countries of the world and their gradual involvement in the energy sector singles out this direction as promising in the context of the gradual transition to carbon-free technologies. The use of hydrogen as a partial replacement of traditional natural gas with fuel combustion equipment may be the first step towards ensuring current and future environmental standards. It should be noted that the determining factor in the emission of harmful substances is the technology of combustion. The authors consider the main stages of building a CFD-model of the combustion process of a mixture of methane-hydrogen fuels in the jet-niche system (JNS) of fuel stabilization and combustion. The technique of CFD-modeling in the Ansys Fluent software environment is given. The analysis of the obtained results is carried out, namely the influence of geometric and mode parameters of the stabilizer on the combustion process at different ratios of concentrations of methane-hydrogen components. The influence of hydrogen addition on the range and flow rate of fuel jets required to ensure the operating mode of the burner is shown. According to the results of mathematical modeling, the regularities of formation of nitrogen oxides at change of geometrical characteristics of fuel supply are analyzed. The effect of changes in the hydrogen content of the fuel mixture with methane on the NO<sub>x</sub> concentration in the combustion products was also determined. Regularities of flow hydrodynamics in a jet-niche system with variation of hydrodynamic parameter  $q$  for nonisothermal flow are established. Dependences for the calculation of the empirical coefficient, which interprets the depth of penetration of methane-hydrogen jets into the flowing oxidant, are presented. Recommendations for determining the rational design parameters of the fuel distribution of the JNS are given.*

**Key words:** methane-hydrogen mixture, CFD-model, Ansys Fluent, jet-niche system, temperature distribution.

УДК 621.431.74

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/27>**Усов А.В.**

Національний університет «Одеська політехніка»

**Слободянюк М.В.**

Інститут Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

## ВПЛИВ ФАКТОРУ ТИСКА НА ПРОЦЕС ПАЛИВОПОДАЧІ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

Одним із напрямків підвищення ефективності експлуатації суден морської та річкової галузі є забезпечення надійності щодо експлуатаційних можливостей їх енергетичних установок. Досягти надійної результативності у роботі дизельного двигуна, а саме процесу горіння можливо при керуванні паливною системою двигуна, безпосередньо тиском палива з урахуванням відповідних режимів та змінних факторів.

Метою дослідження є встановлення впливу початкових умов на роботу елементів паливної системи високого тиску під час зміни режимів роботи судового дизельного двигуна.

Послідовне дослідження характеристик щодо зміни параметрів тиску палива на елементах паливної системи високого тиску в умовах зміни частоти обертання розподільного валу є важливим аспектом, який характеризує роботу паливної апаратури на несталих режимах. Провести відповідне дослідження найбільш ефективно в умовах експериментальної установки.

Надрукований матеріал містить результати експериментального дослідження роботи елементів паливної системи високого тиску судового дизеля під час пуску на різних початкових умовах. Отримані данні підтверджують, що початкові умови змінюють показники режимів роботи елементів паливної системи високого тиску судового дизельного двигуна.

**Ключові слова:** судовий дизельний двигун, паливна система високого тиску, змінні режими, режим розгону, паливоподача, параметри тиску палива, ступеневе впорскування, тиск палива, початковий тиск.

**Вступ.** Одним із напрямків підвищення ефективності експлуатації суден морської та річкової галузі є забезпечення надійності експлуатаційних можливостей їх енергетичних установок, що, по-перше, дозволяє забезпечити необхідний рівень безпеки мореплавства за рахунок зниження вірогідності виникнення раптових відмов енергетичного обладнання. По-друге, дозволяє отримати науково-методологічну основу для пошуку балансу між безпекою та вартістю її забезпечення, шляхом розроблення або доопрацювання методик чисельної оцінки ризику в нормативних документах Класифікаційних товариств тощо. В-третьє, з погляду на середньострокову перспективу, дизельні двигуни будуть домінуючим типом двигуна внутрішнього згорання на морському та річковому транспорті, деталі яких в процесі здійснення робочих процесів знаходяться під впливом знакозмінних напружень, що багатократно змінюються у часі та впливу змінних факторів навколишнього середовища та команд керування [1].

Значну частину експлуатаційного часу судовий дизельний двигун працює на змінних режи-

мах. Досягти надійної результативності у роботі дизельного двигуна, а саме процесу горіння можливо при керуванні паливною системою двигуна, безпосередньо тиском палива з урахуванням відповідних режимів та змінних факторів. Тому дослідження впливу фактору тиску на процес паливоподачі судового дизеля є актуальним.

**Постановка проблеми.** Метою дослідження є встановлення впливу початкових умов на роботу елементів паливної системи високого тиску під час зміни режимів роботи судового дизельного двигуна.

Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску судового середньобертового дизеля на змінних режимах.

Предмет дослідження – теоретичні основи та методичний підхід щодо процесу паливоподачі на змінних режимах досліджуваного діапазону частоти обертання.

Методологічну основу дослідження становлять методи: дедукції (інформаційний пошук); системний аналіз (під час узагальнення інформаційних матеріалів); фізичне моделювання (при дослідженні процесів паливоподачі).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Попередні дослідження, які представлені у наукових публікаціях авторів [2, 3], вказують на те, що суднові дизельні двигуни працюючи з максимальними експлуатаційними навантаженнями знаходяться під впливом збурень природного походження та експлуатаційних команд керування. В наслідок, експлуатаційні показники судового дизельного двигуна дорівнюють встановленим максимальним значенням, а в деяких випадках, можуть і перевищувати, без загального перевантаження. Що приводить до зменшення потужності, крутного моменту, зміни у розході палива, та інші показники які пов'язані залежністю від частоти обертів. Регулятор обертів судового дизельного двигуна конструктивно налаштовано на утримання частоти обертів. Він надає команди руху рейці паливного насоса високого тиску (далі – ПНВТ), починаються коливання подачі палива. Ризькі або тривалі коливання формують перехідні процеси та зміни у послідовних циклах впорскування. Виникають зміни початку кута впорскування та тривалості впорскування палива, нестабільність підйому та ходу голки форсунки в послідовних циклах. В паливній системі високого тиску змінюються показники тиску палива за фазами впорскування за кожним послідовним циклом на перехідних режимах.

У науковій роботі [4] автором проведено дослідження щодо функціонування дизельного двигуна на несталих та часткових режимах, як елемент складної рівноважної роботи системи, підсистемою була розглянута паливна система високого тиску. Вхідним зв'язком (координатою) буде положення рейки паливного насоса  $h_p(t)$ , а вихідною координатою – циклова подача палива  $g_{ц}$ , яка залежить від частоти обертання колінчастого вала

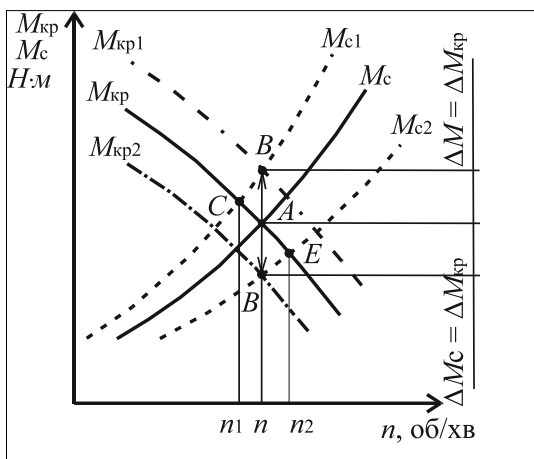


Рис. 1. Інформаційна модель функціонування системи подачі палива дизеля

двигуна  $n$  і, отже, від вхідних координат частоти обертання кулачкового вала  $n_n(t)$ .

Порушення встановленого режиму викликає зміна частоти обертання вала, переміщення рейки паливного насоса, циклової подачі палива в ту чи іншу сторону рис.1.

Перехідний процес викликаний основним параметром зміною циклової подачею палива  $\Delta g_T$  представляється як  $\delta_T = (\Delta g_{T2} - \Delta g_{T1}) : \Delta g_{Tн}$ , а додатковим параметром – період зміни подачі палива  $T_T$  і характер зміни моменту опору від частоти обертання колінчастого вала  $M_{кр} = f(n)$ . З цього типу перехідного процесу визначається два характерних вида:

- збільшення  $n$  – розгін двигуна за рахунок збільшення циклової подачі  $g_{ц}$ ;
- зменшення  $n$  – гальмування двигуна за рахунок зменшення циклової подачі палива  $g_{ц}$  [5].

Крутний момент дизеля пов'язаний з ефективним коефіцієнтом корисної роботи  $\eta_c$  та величиною циклової подачі палива  $g_{ц}$  співвідношенням:

$$M_{кр} = k_g \cdot g_{ц} \cdot \eta_c, \quad (1)$$

де,  $k_g = (H_u \cdot i_g \cdot 10^3) : \pi \cdot z_g$ ;  $H_u$  – теплотворна здатність палива;  $i_g$  – число циліндрів у дизельному двигуні;  $z_g$  – тактність дизельного двигуна.

Рівняння (1) вказує, що крутний момент визначається як середнє значення на різних сталих режимах, і в ньому не враховується в явній формі запізнювання розвитку крутного моменту. При цьому циклова подача палива є основною фізичною (регульованою) величиною, яка впливає на крутний момент.

У дисертаційній роботі [6] «Дослідження міжциклової нестабільності процесів подачі палива дизелів при роботі на режимах малих подач і частот обертання» у якості критерія стабільності роботи паливної апаратури розглядається співвідношення витратних характеристик ПНВТ та форсунки. Ці залежності представлені в формі  $V_n = f_1(p_{зал.})$  та  $V_\phi = f_2(p_{зал.})$ , де  $p_{зал.}$  – залишковий тиск у ПНВТ або у форсунці. Після внесення одиничного обурення в роботу паливної апаратури виникає несталий режим роботи паливної апаратури, що характеризується порушенням балансу витрат через ПНВТ та форсунку. Баланс відновлюється не відразу, а тільки після певної кількості циклів впорскування, тобто зміни залишкового тиску до величини, що відповідає новому режиму роботи паливної апаратури, це відбувається не миттєво. Найбільший інтерес представляють сам несталий режим роботи паливної системи, так як він є характерним для значної частини робочого діапазону циклових



подач палива під час роботи паливної апаратури дизельного двигуна.

Таким чином доцільним є продовження дослідження взаємовпливу робочих процесів, які відбуваються у паливній апаратурі, що особливо актуально під час несталих режимів роботи суднового дизельного двигуна.

**Виклад основного матеріалу.** Послідовне дослідження характеристик щодо зміни параметрів тиску палива на елементах паливної системи високого тиску в умовах зміни частоти обертання розподільного валу є важливим аспектом, який характеризує роботу паливної апаратури на несталих режимах. Провести відповідне дослідження найбільш ефективно в умовах експериментальної установки.

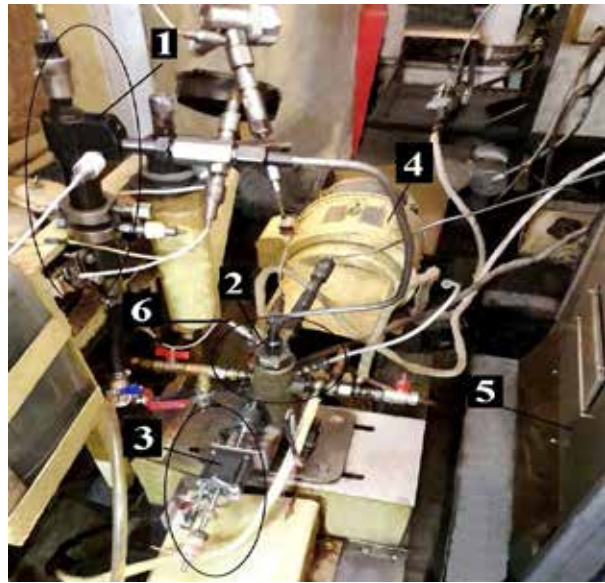
Надрукований матеріал містить результати експериментального дослідження роботи паливної системи високого тиску суднового дизеля при різних початкових умовах, на пусковому режимі.

Досліджувалась паливна апаратура високого тиску суднового дизеля 6ЧН 25/34 у складі: форсунка закритого типу з розпилювачем  $9 \times 0,35$  мм; золотниковий паливний насос високого тиску, діаметр і хід плунжера який становить 16 мм; паливний трубопровід високого тиску довжиною 0,9 м, з діаметрами 9 мм та 3 мм (зовнішній та внутрішній відповідно).

Обертання розподільного валу здійснює електродвигун постійного струму з відповідною системою керування, яка забезпечує плавну частоту обертання. Загальний вигляд паливної системи високого тиску суднового дизеля 6ЧН 25/34 у складі експериментальної установки наведено на рис. 2.

Процес впорскування на експериментальній установці у різних точках фіксувався тензометричними датчиками тиску та індуктивними датчиками переміщення. З подальшою реєстрацією багатоканальним програмно-апаратним комплексом, який складається з наступних складових: – персональний комп'ютер з відповідним пакетом програмного забезпечення; – вимірювальний пристрій типу LTR-U-1 з багатоканальним аналоговим цифровим перетворювачем; – блок підсилювачів і комунації.

Багатоканальний програмно-апаратний комплекс забезпечував безперервне візуальне спостереження на моніторі та запис персональним комп'ютером гідродинамічних та механічних процесів, які відбуваються у елементах високого тиску паливної системи суднового дизеля на всіх режимах роботи.



**Рис. 2.** Загальний вигляд експериментальної установки з випробування паливної апаратури високого тиску суднового дизельного двигуна 6ЧН 25/34:

1 – паливна форсунка з датчиками тиску та переміщення голки розпилювача; 2 – паливний насос високого тиску (ПНВТ) з датчиками тиску; 3 – комплекс керування рейкою ПНВТ; 4 – електропривод постійного струму; 5 – станція керування електроприводом; 6 – датчик тиску ПНВТ.

Під час дослідження реєструвався: тиск палива у штуцері ПНВТ  $p_n$ , у штуцері паливної форсунки  $p_{ф.вх}$ , у каналі форсунки  $p_{ф.к}$ ; переміщення голки розпилювача  $z$ ; частота обертання розподільного валу  $n_p$ ; кут повороту розподільного валу  $\varphi$ ; час впорскування  $t$ . Постійними налаштуваннями були: вихід рейки ПНВТ – 15 мм; стискання кріплення пружини голки форсунки 70 бар.

Раніше [2; 3] були проведені експериментальні дослідження паливної системи високого тиску суднового дизеля 6ЧН 25/34 з двома варіантами початкових умов. Результати експериментальних досліджень використовуються далі для порівняння з параметрами, які встановлені у дослідженні системи впорскування з закритою форсункою.

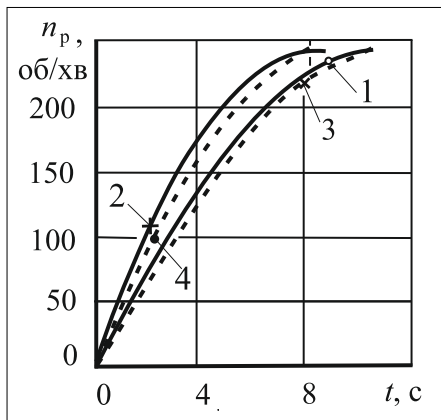
Під час експериментального дослідження зроблено два пуски. Умови першого пуску – паливна система високого тиску розвантажена, початковий тиск дорівнює нулю. Умови другого пуску – пуск виконано безпосередньо після зупинки експериментальної установки, з початковим тиском у паливній системі. При цьому для обох пусків попередньо запускався насос, що забезпечував тиск підкачки 5 бар.

У попередніх експериментальних випробуваннях насос, що підкачує паливо не вмикався, паливо подавалося з ємності самопливом із статичним тиском на вхід до ПНВТ 0,05 бар.

Оскільки було встановлено [2], що початкові умови не надають помітного впливу на параметри подачі палива при сталому режимі і вибігу, в даному матеріалі розглядається ділянка розгону.

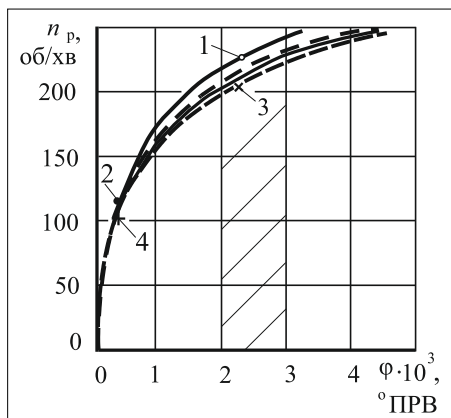
Тахограми двох зазначених вище пусків (з підкачкою) та різними значеннями початкового тиску представлені на рис. 3 кривими 3 та 4. Аналогічні тахограми отримані у роботі [3] (без підкачки) та відповідають кривим 1 та 2. На кожній тахограмі вказуються точки першого впорскування.

Розміщення тахограм розгону на рис. 3 вказує, що система з залишковим тиском без підкачки володіє найбільшим динамічним рухом. Точки 1, 2, 3, 4 вказують на різницю формування умов першого впорскування. Так, при наявності



**Рис. 3. Тахограми розгону, функція залежності обертів від часу  $n_p = f(t)$ :**

1, 3 – паливна система розвантажена; 2, 4 – паливна система з залишковим тиском; (—) паливна система без підкачки; (---) паливна система з підкачкою; (\*, +, x, o) точки на кривих – перше впорскування на відповідному режимі



**Рис. 4. Тахограми розгону, функції від кута повороту  $\varphi = f(n_p)$  (позначення на рис. 3)**

залишкового тиску (точки 2, 4), початок впорскування починається на обертах у два рази менше, ніж у розвантажувальній паливній системі (точки 1, 3).

Слід зазначити, що під час аналізу залежності частоти обертання від функції кута повороту  $\varphi = f(n_p)$  з моменту початку обертання розподільного валу отримуємо інші висновки рис. 4.

У даному випадку під час однакових кутах впорскування найбільша частота обертів досягається паливною системою, яка розвантажена та не має підкачки. Очевидно, опір, що створюється ПНВТ, у цьому випадку мінімальний та відповідає зазначеному співвідношенню. В якості ілюстрації цього факту можна вказати відмінність в частоті обертання на ділянці  $\varphi (2-3) \cdot 10^3$  °ПРВ, що склало 10 об/хв (рис. 4 точки 1, 3).

Що стосується першого впорскування, то основним параметром, що визначає його характеристики, є початковий тиск.

У паливній системі, яка розвантажена, перші впорскування спостерігаються при  $\varphi = 2,76 \cdot 10^3$  °ПРВ,  $n_p = 219$  об/хв, що становить 7,6 оборотів кулачкового валу (рис. 4 точка 1). З підкачкою (рис. 4 точка 3)  $\varphi = 2,52 \cdot 10^3$  °ПРВ,  $n_p = 219$  об/хв, що становить 7,0 оборотів кулачкового валу.

У паливній системі з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою умови першого впорскування близькі та мають наступні показники  $\varphi = 360$  °ПРВ,  $n_p = 102 - 100$  об/хв, що становить 1,0 обороту кулачкового валу (рис. 4 точки 2, 4).

Отже, величина тиску палива на вході до ПНВТ у діапазоні дослідження від  $0,05 \div 5$  бар не робить істотного впливу на розвиток процесу впорскування під час розгону.

Чисельні показники параметрів подачі палива для різних початкових умов наведені у таблиці 1.

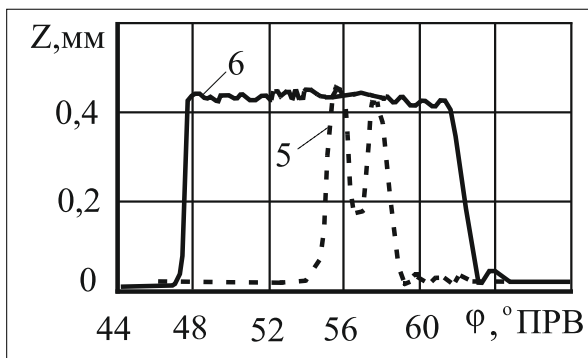
Розглянемо особливості сформованих характеристик паливної системи суднового дизеля за фазами впорскування під час режиму розгону при різних початкових умовах.

Осцилограми переміщення голки форсунки  $z$  під час ступеневого впорскування розвантаженої паливної системи без підкачки та з підкачкою наведені на рис. 5. Характеристики зазначених режимів (табл. 1) знаходяться у межах  $n_p = 221 - 229$  об/хв (рис. 5а) та  $n_p = 212 - 219$  об/хв (рис. 5б).

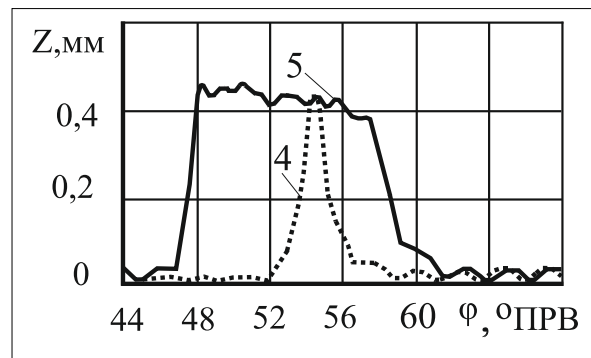
Можна відзначити, що кут впорскування під час ступеневого впорскування в умовах розвантаженої паливної системи без підкачки та з підкачкою не значний та складає  $4,5^\circ$ ПРВ та  $4^\circ$ ПРВ відповідно (рис. 5а осцилограма 5, рис. 5б осцилограма 4).

## Фази впорскування на режимі розгону

Фази впорскування на режимі розгону	Паливна система					
	розвантажена			з залишковим тиском		
	№ циклів	$n_p$ , об/хв	$\varphi \cdot 10^3$ , °ПРВ	№ циклів	$n_p$ , об/хв	$\varphi \cdot 10^3$ , °ПРВ
<i>1 серія випробувань: паливна система без підкачки</i>						
ділянка тахограми розгону, умови впорскування не сформувалися	1–4	173–213	0,96–2,04	–	–	–
ділянка тахограми розгону, ступеневе впорскування	5	221	2,40	–	–	–
перший цикл стійкого впорскування на ділянці тахограми розгону	6	229	2,76	1	102	0,36
останній цикл впорскування на ділянці тахограми розгону	26	243	–	20	243	–
<i>2 серія випробувань: паливна система з підкачкою</i>						
ділянка тахограми розгону, умови впорскування не сформувалися	1–3	168–202	1,08–1,80	–	–	–
ділянка тахограми розгону, ступеневе впорскування	4	212	2,16	–	–	–
перший цикл стійкого впорскування на ділянці тахограми розгону	5	219	2,52	1	100	0,36
останній цикл впорскування на ділянці тахограми розгону	23	245	–	18	245	–



а



б

Рис. 5. Осцилограма переміщення голки форсунки під час ступеневого впорскування:

а – паливна система без підкачки, б – паливна система з підкачкою; 4, 5, 6 – цикли ступеневого та першого стабільного впорскування

Що стосується кута першого стабільного впорскування  $\varphi_{\text{вп}}$  у відповідних умовах, кути різняться більш суттєво, а саме  $16,2^\circ \text{ПРВ}$  та  $12,5^\circ \text{ПРВ}$  (рис. 5а осцилограма 6, рис. 5б осцилограма 5).

Осцилограми тиску палива на вході до форсунки  $p_{\text{ф.вх}}$  для різної частоти обертання під час ступеневого впорскування, коли паливна системи розвантажена без підкачки та з підкачкою, а також перше впорскування паливної системи з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою наведені на рис. 6.

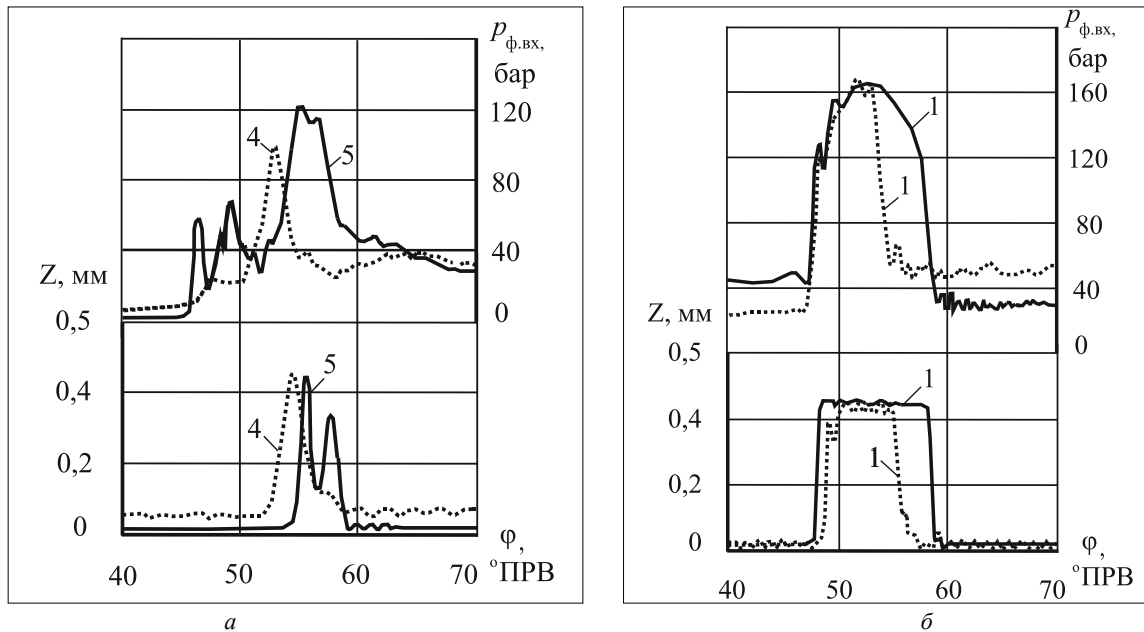
Осцилограма тиску палива на вході до форсунки  $p_{\text{ф.вх}}$  (рис. 6 а, крива 5) показує, що коли паливна система розвантажена та відсутня підкачка тиск має три пікових значення. Перші два піки тиску не перевищували тиску затягування пружини голки форсунки межею у 70 бар. Третій пік тиску досяг робочого значення, але треба відзначити, що через недостатню частоту обертання розподільного валу впорскування мало ступеневий вигляд.

Осцилограми тиску палива на вході до форсунки  $p_{\text{ф.вх}}$  (рис. 6 б) цикли першого стабільного впорскування у паливній системі з залишковим тиском коли підкачка відсутня та з підкачкою мають близьку форму за виглядом. Максимальні значення тиску майже рівні (166 та 167 бар відповідно).

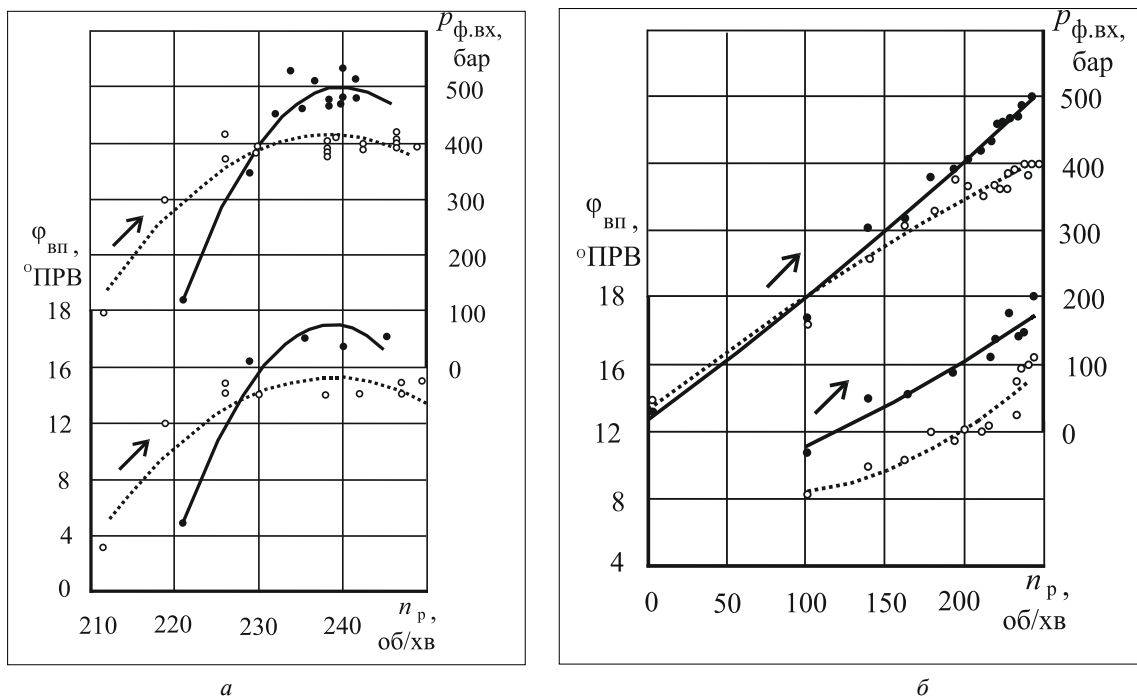
У паливній системі при умові, що є залишковий тиск та відсутня підкачка палива, кут впорскування  $\varphi_{\text{вп}}$  на  $2,8^\circ \text{ПРВ}$  більше ніж з підкачкою. Впорскування починається на  $3^\circ \text{ПРВ}$  раніше, ніж у паливній системі з підкачкою.

Залежність параметрів подачі палива від частоти обертання на режимі розгону на різних початкових умовах представлена на рис. 7.

Аналізуючи дані, які були отримані під час зміни двох умов дослідних випробувань – початковому тиску в системі та наявності підкачки. Величини тиску палива та кута впорскування, отримані під



**Рис. 6. Осцилограми тиску палива на вході до форсунки  $p_{ф.вх}$  під час режиму розгону:**  
 а – паливна система розвантажена; 4, 5 – цикли ступеневого впорскування; б – паливна система з залишковим тиском;  
 1, 1 – цикли першого стабільного впорскування; (—) підкачка відсутня; (- - -) з підкачкою (позначення в тексті).



**Рис. 7. Залежність параметрів подачі палива від частоти обертання на режимі розгону на різних початкових умовах:**

а – паливна система розвантажена; б – паливна система з залишковим тиском; (—•—) підкачка відсутня, (- - ° - -) з підкачкою (позначення в тексті).

час розгону, наведені на рис. 7. Для розвантаженої паливної системи (рис. 7а) характерно відзначене раніше суттєве запізнення першого впорскування з значною кількістю пропусків подачі та з відповідним зростанням початкової частоти обертання.

При цьому умови наповнення ПНВТ не роблять помітного впливу на тривалість підготовчої ділянки. Лише в умовах коли паливна система розвантажена, початкова частота впорскування дещо зменшується (близько 10 об/хв),

що не перевищує 5% поточної частоти обертання розподільного валу. При наявності залишкового тиску впорскування починається при однакових величинах  $n_p = 100$  об/хв, це вдвічі менше, ніж за відсутності початкового тиску.

Чисельні показники параметрів впорскування під час режиму розгону на різних початкових умовах зведені у табл. 2 та табл. 3.

Чисельні показники параметрів подачі палива для різних початкових умов обох випробувань, які наведені у табл. 1. мають наступні фази (ділянки) впорскування на режимі розгону (цикли):

- ділянка тахограми розгону, умови впорскування не сформувалися;
- ділянка тахограми розгону, ступеневе впорскування;
- перший цикл стійкого впорскування на ділянці тахограми розгону;
- останній цикл впорскування на ділянці тахограми розгону.

Кількість циклів впорскування на ділянці розгону (в яких умови впорскування не сформувалися) в першій серії без підкачки було 4, у другій серії (з підкачкою) кількість таких циклів зменшилася до 3. Обороти розподільного валу склали при цьому відповідно 173–213 об/хв та 168–202 об/хв.

Цикли ступеневого впорскування розвантаженої системи без підкачки і з підкачкою фіксувалися на оборотах 221 об/хв та 212 об/хв.

Умови першого впорскування розвантаженої паливної системи без підкачки сформувалися на 229 об/хв, а з підкачкою на 219 об/хв.

Таким чином, на початку розгону розвантаженої системи, умови впорскування формуються під час досягнення частоти обертання близьких до номінальної. При цьому з'являється вплив умов наповнення ПНВТ, а саме початкова частота впорскування з підкачкою на 5% менше.

Режим розгону тривав до досягнення значення 245 об/хв. Коли паливна система розвантажена та без підкачки або з підкачкою кількість циклів на даній ділянці склало 26 та 23. У паливній системі з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою 20 та 17 відповідно.

Різниця кутів першого стабільного впорскування  $\varphi_{вп}$  паливної системи, яка розвантажена без підкачки та з підкачкою склала 3,7°ПРВ (табл. 2 цикли 5 та 6). У паливній системі з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою дорівнює 2,8 °ПРВ (табл. 3 цикл 1).

Величина початкового тиску  $p_{поч}$  в паливній системі з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою, склала 27 бар та 43 бар.

Величина тиску палива на вході до форсунки  $p_{ф.вх}$  під час режиму розгону, коли паливна система має залишковий тиск рис. 6б вказує, що початковий тиск не впливає на значення максимального тиску в системі. Частота обертання розподільного валу під час

Таблиця 2

**Показники розвантаженої паливної системи високого тиску під час режиму розгону (підкачка відсутня / з підкачкою)**

п/н, циклу	$n_p$ , об/хв	$t$ , с	$P_{ф.вх}$ , бар	$P_{ф.к}$ , бар	$P_{н.}$ , бар	$\varphi_{вп}$ , °ПРВ	Фаза випробування
1/-	173/-	6,28/-	1-2/-	1-2/-	3/-	0/-	розгін
2/1	185/168	6,57/6,13	2/4,3	1-2/1-2	5/10	0/0	розгін
3/2	200/188	6,83/6,47	2/6,6	1-2/1-2	7/10	0/0	розгін
4/3	213/202	6,91/6,78	40/9,3	20/3	55/11	0/0	розгін
5/4	221/212	7,19/7,08	121/99	125/93	118/70	4,5/4,0	ступеневе впорскування
6/5	229/219	7,46/7,35	344/299	345/297	381/299	16,2/12,5	перший цикл стійкого впорскування
7/6	232/226	7,72/7,63	452/361	449/365	488/364	17,5/14,2	розгін
26/23	245/245	12,45/11,86	500/398	501/406	532/397	18/15,2	останній цикл впорскування під час розгону

Таблиця 3

**Показники паливної система високого тиску з залишковим тиском під час режиму розгону (підкачка відсутня / з підкачкою)**

п/н, циклу	$n_p$ , об/хв	$t$ , с	$P_{ф.вх}$ , бар	$P_{ф.к}$ , бар	$P_{н.}$ , бар	$\varphi_{вп}$ , °ПРВ	Фаза випробування
-	0	0	27/43	27/43	27/43	0	$p_{поч}$ , залишковий тиск
1/1	102/100	2,66/3,19	166/159	163/161	188/169	10,8/8,0	перший цикл стійкого впорскування
2/2	140/138	3,16/3,70	307/257	301/253	329/248	14/10	розгін
20/17	245/245	8,17/8,70	493/393	486/392	529/401	17,9/16	останній цикл впорскування під час розгону

першого впорскування майже збігається. Дійсно, зазначені значення  $n_p$  під час першого впорскування з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою близькі і складають відповідно 102 та 100 об/хв.

**Висновки.** Умови наповнення ПНВТ впливають на початкову ділянку розгону. А саме під час підвищення тиску палива на вході до ПНВТ, шляхом включення насоса, який підкачує паливо, скорочується кількість циклів від початку розгону до заданого режиму роботи паливної системи, у випробуванні було 6 циклів.

Залежність параметрів розгону від тиску підкачки характеризується наступним чином: на ділянці розгону найбільш помітний вплив початкового тиску, який формувався після короткочасної зупинки експериментальної установки без розвантаження паливної системи високого тиску. Так, умови першого впорскування у випробуванні сформувалися під час частоти обертання 102–100 об/хв на відміну від розвантаженої паливної системи, котра склала 229–219 об/хв.

Початковий тиск  $p_{\text{поч}}$  та оберти розподільного валу впливають на величину кута впорскування. У розвантаженої паливної системі без підкачки та з підкачкою відношення величин кутів першого стабільного впорскування і впорскування  $\varphi_{\text{вп}}$  склало 1,11 та 1,21. У паливній системі з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою відповідне ставлення кутів  $\varphi_{\text{вп}}$  склало 1,65 та 2,00.

Різниця кутів першого стабільного впорскування в експериментальних дослідженнях для розвантаженої паливної системі без підкачки та з підкачкою склало 3,7 °ПРВ, для паливної системі з залишковим тиском без підкачки та з підкачкою 2,8 °ПРВ. Таким чином, тиск підкачки зменшує вплив на тривалість кута першого стабільного впорскування.

Виконані експериментальні дослідження дозволили встановити вплив початкових умов на характеристики впорскування під час зміни режимів у роботі паливної системи високого тиску судового дизеля.

#### Список літератури:

1. Слободянюк М.В. Вдосконалення процесів впорскування палива судового дизеля : дис. ... канд. техн. наук : спец.05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». Одеса, 2021. 20 с.
2. Половинка Э.М. Процесс впрыскивания топлива в судовом среднеоборотном дизеле на переменных режимах / Э.М. Половинка, Н.В. Слободянюк. Одесса : Судовые энергетические установки. 2016. Вып. 36. С. 141–151.
3. Половинка Э.М. Скоростные характеристики системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля на переменных режимах / Э.М. Половинка, Н.В. Слободянюк. *Молодий вчений*. 2016. № 3(43). С. 735–740.
4. Абраров М.А. Повышение эффективности функционирования дизеля машинно-тракторного агрегата электронным регулированием топливоподачи : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02 «Тепловые двигатели». Санкт-Петербург – Пушкин, 2013. 20 с.
5. Костин А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник / А.К. Костин, Б.П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев; Под общ. ред. А.К. Костин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 284 с.: ил.
6. Чистяков А.Ю. Исследование межциклового неустойчивости процессов топливоподачи дизелей при работе на режимах малых подач и частот вращения : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Александр Юрьевич Чистяков. Хабаровск, 2006. 199 с.

#### Usov A.V., Slobodianiuk M.V. INFLUENCE OF THE PRESSURE FACTOR ON THE FUEL SUPPLY PROCESS SHIP DIESEL

*One of the ways to increase the efficiency of operation of sea and river vessels is to ensure reliability in terms of operational capabilities of their power plants. Achieve reliable performance in the operation of the diesel engine, namely the combustion process is possible by controlling the fuel system of the engine, directly by the fuel pressure, taking into account the relevant modes and variables.*

*The aim of the study is to establish the influence of the initial conditions on the operation of the elements of the high-pressure fuel system during the change of modes of operation of the marine diesel engine.*

*Consistent study of the characteristics of the change of fuel pressure parameters on the elements of the high pressure fuel system in the conditions of changing the speed of the camshaft is an important aspect that characterizes the operation of fuel equipment at unstable modes. To carry out the corresponding research most effectively in the conditions of experimental installation.*

*The printed material contains the results of an experimental study of the elements of the high-pressure fuel system of a marine diesel engine during start-up under different initial conditions. The obtained data confirm that the initial conditions change the performance of the high pressure fuel system elements of the marine diesel engine.*

**Key words:** *marine diesel engine, high pressure fuel system, variable modes, acceleration mode, fuel supply, fuel pressure parameters, step injection, fuel pressure, initial pressure.*

## РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.228+[662.97:621.571.22]

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/28>

**Рудаков Д.В.**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Інкін О.В.**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

### ОБГРУНТУВАННЯ ПЕРІОДИЧНОГО ВОДОВІДБОРУ ІЗ ЗАТОПЛЕНИХ ШАХТ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЇХ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

*Представлені дослідження спрямовані на обґрунтування раціональних параметрів шахтного дренажу при використанні шахтних вод як джерела низькопотенційної теплової енергії. Розглядається приклад системи гідравлічно поєднаної Селидівської групи шахт з відбором води на одній з них (№ 2 «Новогродівська») і подальшим потенційним використанням на геотермальній системі для опалювання та гарячого водопостачання. Тепловий потенціал затоплених шахт оцінюється на основі змішування вод з різною температурою, які надходять шляхом інфільтрації, гідравлічного перетікання з сусідніх шахт та припливу підземних вод з урахуванням геотермічного градієнту від теплового поля Землі.*

*В рамках порівняльного прогнозного аналізу ефективності різних технологічних варіантів шахтного дренажу, суміщеного з використанням тепла шахтних вод, водовідлив на шахті № 2 «Новогродівська» розглядався для змінного у часі та усталеного рівня шахтних вод на різних позначках. Було виконано кількісне порівняння основних показників водовідливу та геотермальної системи при підтриманні рівня шахтних вод нижче гідродинамічно безпечного рівня на 26–35 м та 10–20 м, причому при водовідливі як протягом лише опалювального періоду (5 місяців), так і цілого року. Показано, що водовідбір з більш низьким положенням рівня шахтних вод дозволяє отримати більше теплової енергії, хоча з більшими витратами електроенергії на підйом води та теплової насоси. Відношення отриманої протягом року теплової енергії до електроенергії, що витрачається на експлуатацію геотермальної системи оцінюється у 3,48–3,62.*

*За допомогою розробленої методики можливо визначати рівень шахтних вод, який доцільно підтримувати для існуючих потреб теплової енергії. Це дає можливість домогтися оптимального суміщення у часі водовідливу з роботою геотермальної системи та фактичним освоєнням теплової енергії споживачами. Таким чином, новизна роботи полягає у запропонованому суміщенні у часі водовідбору та використання тепла шахтних вод у період опалювального сезону, що дає можливість оптимізувати місцевий енергобаланс з витратами на шахтний дренаж та прибутком від виробленої теплової енергії протягом року.*

**Ключові слова:** шахтні води, водовідбір, тепловий потік, геотермальні системи, насоси, теплозабезпечення.

**Постановка проблеми.** Відповідно до світових тенденцій та цілей сталого розвитку ООН Концепція реформування вугільної галузі 2020 в Україні ставить за мету зростання частки відновлювальної енергетики, у тому числі за рахунок скороченням вугільної індустрії [1]. За останніми оцінками, число непрацюючих шахт в країні в найближчому майбутньому зростатиме, що потребуватиме значних витрат для підтримання їх гідродинамічної безпеки, зокрема, попередження неконтрольованого підтоплення тери-

торії, що викликає деформації земної поверхні та будівель [2]. При цьому шахтні води та породний масив є величезним джерелом та поновлюваним ресурсом низькопотенційної теплової енергії, використання якої за допомогою теплових насосів наразі вже є доцільним і може частково покривати витрати на водовідлив.

Виходячи зі світового досвіду, освоєння тепла закритих шахт стає економічно ефективним тільки у разі наявності біля них потужних споживачів, готових постійно споживати вироблювану теплову

енергію [3, 4]. Однак у кліматичних умовах України тривалість опалювального сезону з великими потребами у теплозабезпеченні зазвичай не перевищує 5 місяців (листопад – березень). Протягом інших місяців тепло шахтних вод може бути використане лише на гаряче водопостачання. Але, як правило, шахтний водовідлив працює цілий рік, тому відповідні енерговитрати в неопалювальний період складніше компенсувати за рахунок використання тепла відкачуваних шахтних вод.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час у країнах з розвинутою в минулому вугільною індустрією (Німеччина, Великобританія, Сполучені Штати, Іспанія та інші) на закритих шахтах експлуатуються кілька десятків геотермальних систем відкритого типу (теплоносій – шахтні води) та закритого типу – зондів (теплоносій – спеціальна рідина, гідравлічно ізольована від шахтних вод) [5, 6]. Зазначені технологічні схеми були адаптовані до умов шахт, які знаходяться в різних стадіях ліквідації, при цьому була обґрунтована принципова можливість використання інфраструктури закритої вугільної шахти та її енергетичного ресурсу для вироблення теплової енергії [7, 8]. У роботі [9] були запропоновані екологічно прийнятні схеми локального дренажу шахтних вод, що забезпечують відновлення їх рівня до природного (доексплуатаційного) стану з попередженням підтоплення і забруднення денної поверхні.

Однак при виборі варіанта закриття шахт та їх водовідливу питання суміщення їх водовідливу з роботою геотермальної системи та споживанням теплової енергії розглядалися недостатньо. Зокрема, не досліджувались можливості періодичного водовідливу, суміщеного з періодом найбільшого попиту на теплову енергію за умови підтримки гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод протягом всього року. Це пов'язано, з одного боку, з проблемами достовірного прогнозування додаткового водоприпливу в закриті шахти з сусідніх, а з другого – технологічними особливостями шахтного водовідливу. Надання таких оцінок є комплексним завданням, що потребує розробки методики для визначення термогідродинамічних параметрів закритих шахт при різних технологічних варіантах використання їх теплового ресурсу.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є обґрунтування та апробація методики оцінки показників використання геотермального потенціалу затоплених шахт в умовах періодичного водовідбору з них та виконання порівняльного аналізу ефективності цих варіантів.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розроблювана методика розглянута для умов Селидівської групи шахт, до складу якої входять шахти № 2 «Новгородівська», ім. Д.С. Коротченка та «Селидівська», що закриваються, та суміжна з ними діюча шахта № 1–3 «Новгородівська». За адміністративним поділом ця група шахт входить до Покровського вуглепромислового району Донецької області. За геологічним районуванням технооекосистема відноситься до Донецького кам'яновугільного басейну і розташована в межах Красноармійської моноклінали, порушеної тектонічними структурами – гілками Новгородівського скиду та Селидівського насуву.

Згідно з даними «Донецькгеологія» та геологічної служби шахти № 1-3 «Новгородівська» [10], станом на вересень 2019 р. шахта № 2 «Новгородівська» була затоплена до абс. відм. +121,1 м, сусідня з нею шахта ім. Д.С. Коротченка – до абс. відм. +164,15 м. За даними спостережень та аналітичних оцінок встановлено, що води шахти ім. Д.С. Коротченка надходять до затопленої шахти № 2 «Новгородівська» по вугільним пластам, через кору вивітрювання карбону та палеоген-неогенові піски, а також Гродівський скид загальною витратою близько 35 м<sup>3</sup>/год. Крім того, до шахти № 2 «Новгородівська» надходить водоприплив за рахунок інфільтрації та підземних вод. Проектом застосування існуючої інфраструктури шахт Селидівської групи в процесі їх закриття для підтримання безпечного гідрогеологічного режиму і попередження підтоплення в [11] пропонувався додатковий водовідлив з шахти № 2 «Новгородівська» потужністю до 125 м<sup>3</sup>/год, що буде достатньо для дренажу даної території.

Шахтний дренаж доцільно спрямувати на задоволення потреб в опаленні мешканців м. Новгородівка, на території якого розташована ця шахта за допомогою систем відкритого типу зі скиданням термічно відпрацьованих шахтних вод у ставки-відстійники, а після відстоювання – в гідрографічну мережу. Відбір тепла шахтних вод при цьому відбувається за допомогою проміжного теплообмінника, який використовується як низькопотенційне джерело теплової енергії для теплового насоса. Трансформоване тепло з насоса передається споживачам для опалення та гарячого водопостачання.

Методика розрахунку параметрів теплопостачання включає визначення діапазону рівня шахтних вод у затопленій шахті в умовах періодичного водовідбору, розрахунок теплової енергії, що може бути вилучена з шахтних вод

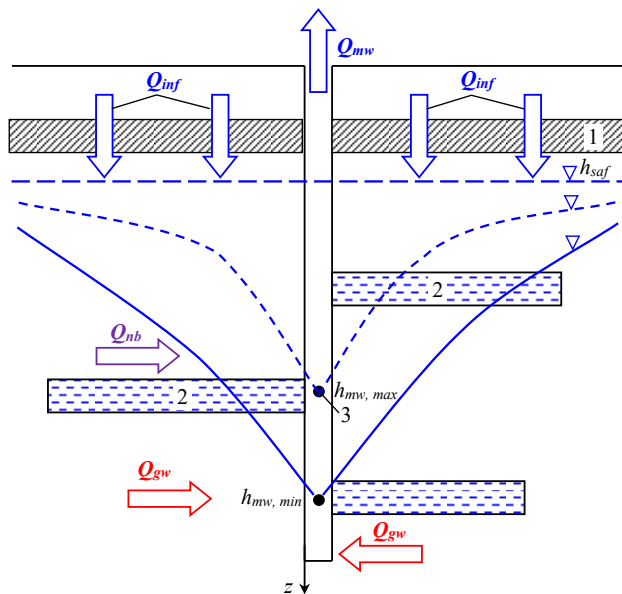


для опалення та гарячого водопостачання, електричної енергії, необхідної для роботи теплових насосів та водопідйомників, та розрахункову оцінку теплової потужності, яка можуть бути забезпечена наявним тепловим потоком. Приймається, що перенос тепла практично не впливає на об'єми ануру вальні до виробок, тому температуру води можна розраховувати після розрахунку водного балансу. Крім того, вважається, що при водовідборі відбувається змішування всієї води, що надходить до дренажної шахти з трьох джерел.

Рівень шахтних вод визначається з рівняння водного балансу затопленої шахти (рис. 1):

$$Q_{inf} + Q_{gw} + Q_{nb} - Q_w = S_w (h_{mw}) \frac{\Delta h_{mw}}{\Delta t}, \quad (1)$$

де  $Q_{inf}$  – приплив інфільтраційних вод,  $Q_{gw}$  – приплив підземних вод,  $Q_{nb}$  – приплив води з сусідньої шахти, яка гідравлічно пов'язана з дренажною шахтою,  $S_w$  – площа горизонтального перетину виробок на рівні води у шахті  $h_{mw}$ ,  $\Delta t$  – проміжок часу, за який відбувається зміна рівня води на величину  $\Delta h_{mw}$ .



**Рис. 1.** Схема водовідбору з затопленої шахти: 1 – водотрив; 2 – затоплені виробки; 3 – занурювальний насос;  $h_{mw, max}$ ,  $h_{mw, min}$  – максимальний та мінімальний рівень положення насоса;  $h_{saf}$  – гідродинамічно безпечний рівень шахтних вод;  $Q_{mw}$  – водовідбір з шахти;  $Q_{nb}$  – водопритлив із сусідніх шахт;  $Q_{inf}$  – водопритлив за рахунок інфільтрації;  $Q_{gw}$  – приплив підземних вод

Складові балансу  $Q_{inf}$  та  $Q_{nb}$  в умовах коливань рівня шахтних вод до 20 м протягом року можна прийняти усталеними; приплив підземних вод  $Q_{gw}$  буде змінюватися відповідно до коливань рівня води при сезонному водовідборі.

Неусталений рівень шахтних вод  $h_{mw}(t)$  в умовах змінного в часі водовідбору  $Q_w(t)$  розраховується шляхом моделювання радіального припливу до шахтного ствола, який схематизується як гідравлічно поєднаний з виробками великий колодязь [12] зі змінним у часі рівнем води. Цим способом за допомогою аналітичних співвідношень теорії фільтрації вдалося досить точно відтворити процес затоплення трьох шахт у Німеччині, як гідравлічно ізольованих, так і поєднаних виробками з однією–двома сусідніми шахтами.

Температуру води, що припливає до виробок з різних джерел, можна розрахувати у першому наближенні відповідно до лінійних співвідношень залежно від геотермічного градієнту [13; 14].

Максимальна тепла потужність  $q_{max}$ , яка може бути створена на поверхні землі за допомогою геотермальної системи з тепловими насосами біля водовідливу зі скидом термічно відпрацьованих вод до поверхневих водотоків чи водойм, розраховується за формулою

$$q_{max} = C_w \rho_w Q_w (T_{mw} - T_{min}), \quad (2)$$

де  $C_w$ ,  $\rho_w$  – питома теплоємність та густина шахтних вод,  $T_{mw}$  – температура відкачуваних шахтних вод,  $T_{min}$  – мінімальна температура охолодження в теплових насосах, в оцінках для сучасних теплових насосів приймається  $T_{min} = 6^\circ\text{C}$ .

Споживання тепла може бути розраховано за кількома методиками. Згідно [15], для розрахунку кількості тепла, необхідної для обігріву житлових будинків в опалювальний період, з урахуванням кількості осіб, що перебувають чи проживають у приміщеннях, використовується формула

$$q_1 = q_0 k V (T_r - T_{av}), \quad (3)$$

де  $q_0$  – середні питомі опалювальні характеристики будівлі;  $k$  – коефіцієнт, що враховує залежність витрат тепла від типу системи опалення;  $T_r$  – температура в приміщенні (найбільш сприятлива для людини  $T_n = 22^\circ\text{C}$ ). Методика дозволяє розраховувати об'єм приміщень, що обігріваються, та тепла для гарячого водопостачання залежно від кількості осіб ( мешканців) у будинках, виходячи з норма проживання та споживання підігрітої води на одну особу.

Витрати електроенергії для підйому води насосами розраховуються за методикою [16], а для роботи теплових насосів – за формулою

$$COP = h \frac{T_p}{T_p - T_{mw}}, \quad (4)$$

де  $h$  – коефіцієнт термодинамічної досконалості теплового насоса (0,5);  $T_p$  – температура теплоносія у споживача тепла (прийнята при розрахунках 50 °С).

Розрахунки для умов шахт № 2 «Новгородівська» та ім. Д.С. Коротченка проводилися за вихідними даними з табл. 1. Властивості шахтних вод визначалися за їх середній мінералізації 3–5 г/дм<sup>3</sup>. Розглядалися два варіанти підтримання рівня шахтних вод та водовідбору протягом опалювального сезону тривалістю 5 місяців: 1) від +150 м до максимально +165 м, 2) від +165 м до максимально +180 м. Для порівняння розглядалися також можливість постійного водовідливу протягом року при еквівалентному водовідборі за весь рік. Гідродинамічно безпечним рівнем для шахти № 2 «Новгородівська» згідно з місцевими умовами [11] прийнято +185 м. Відповідно до формул [13, 14] та діапазону глибин виробок у шахті ім. Д.С. Коротченка з –312,5 м по +185 м

середня температура вод з шахти ім. Д.С. Коротченка була визначена  $T_{nb} = 17,05$  °С, температура інфільтраційних вод  $T_{inf} = 10,5$  °С, а температура підземних вод для варіанту «1»  $T_{gw} = 18,69$  °С, варіанту «2»  $T_{gw} = 18,62$  °С, що відповідає діапазону глибин виробок у шахті № 2 «Новгородівська» з –370,3 м по +205 м. Значення гідрогеологічних параметрів прийняті такі: інтенсивність інфільтраційного живлення  $w_{inf} = 1,09 \cdot 10^{-4}$  м/доб, коефіцієнт фільтрації у зоні виробок  $k_f = 1,2$  м/доб, активна тріщинувата пористість  $n_{e,a}$  у зоні виробок 0,01. Глибина розміщення насоса для водовідбору при витратах електроенергії визначалась при заглибленні насосу 5 м під водою для поверхні землі +210 м. При розрахунках показників геотермальної системи враховувались втрати 10% тепла при його транспортуванні.

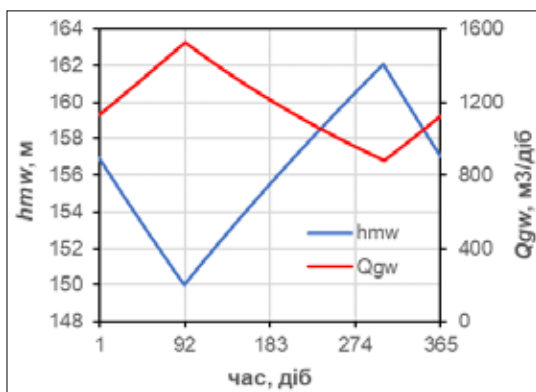
Динаміка підйому води (рис. 2) для розглянутих варіантів підтримання рівня шахтних вод та оцінюваний сумарний водоприплив добре узгоджуються з даними моніторингу та прогнозних оцінок для цієї групи шахт щодо темпів затоплення при виключеному водовідливі [11].

Згідно результатів розрахунків (табл. 2) варіанти «1» та «1а» дозволяють створити суттєво більшу теплову потужність, однак це потребує

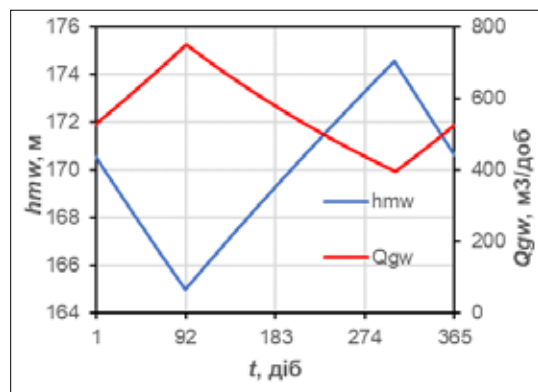
Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку рівня шахтних вод у шахті № 2 «Новгородівська» при водовідборі протягом опалювального сезону

Параметр	Позначення	Значення	Розмірність
Об'єм виробленого простору	$V_w$	2,7	млн м <sup>3</sup>
Водоприплив із сусідніх шахт	$Q_{nm}$	720 – 960	м <sup>3</sup> /доб
Водовідбір з шахти	$Q_{mw}$	2300 – 3240	м <sup>3</sup> /доб
Тривалість відбору шахтних вод	$\Delta t_{dr}$	150	діб
Висотний рівень виробок	$H_{wk, min/max}$	+121 – +185	м абс.
Безпечний рівень шахтних вод	$h_w$	+185	м абс.
Площа шахтного поля	$S_m$	18	млн м <sup>2</sup>



а



б

Рис. 2. Прогнозна зміна рівня шахтних вод  $h_{mw}$  та припливу підземних вод  $Q_{gw}$  за варіантами «1» та «2»

Таблиця 2

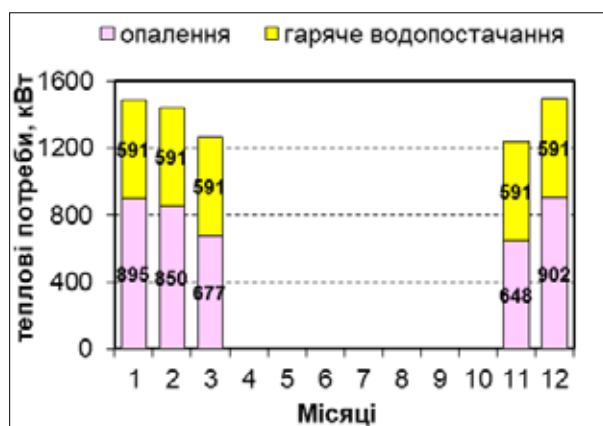
**Результати розрахунків за варіантами «1», «1а», «2» і «2а» при періодичному та усталеному водовідборі протягом опалювального сезону**

Параметр	Варіанти			
	«1»	«1а»	«2»	«2а»
Рівень шахтних вод $h_{mw}$ , м. абс.	+150...+162,1	+156,1	+165...+174,6	+169,8
Приплив підземних вод $Q_{gw}$ , м <sup>3</sup> /доб	880,3...1528,6	1173,5	395,4...749,0	555,0
Період водовідбору	Листопад – березень	Протягом року	Листопад – березень	Протягом року
Водовідбір $Q_w$ , м <sup>3</sup> /доб	7200	3013,1	5700	2388,0
Середня температура води, що відбирається, °С	15,53	15,53	14,71	14,71

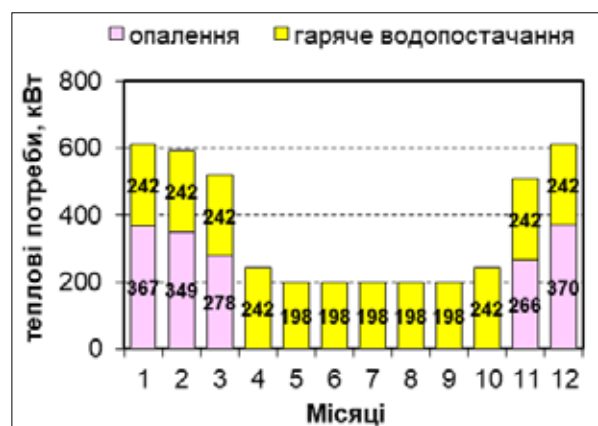
Таблиця 3

**Теплові потреби, що можуть бути задоволені у разі різних варіантів дренажу шахти та створення геотермальної системи (табл. 2)**

Варіанти водовідбору	$q_{max}$ , кВт*	$E_a$ , МВт год	$E_s$ , МВт год	$E_d/E_s$	$S_{min}$ , м <sup>2</sup>	$N_{min}$
«1»	1501,2	5476,4	1514,1	3,62	80100	1780
«1а»	625,5	5479,4	1516,0	3,61	32850	730
«2»	1086,4	3963,2	1138,9	3,48	57600	1280
«2а»	452,7	3965,7	1141,0	3,48	23400	520



а



б

Рис. 3. Ресурс теплозабезпечення для варіантів «1» (а) та «1а» (б)

більших витрат електроенергії на підтримання роботи геотермальної системи через більшу глибину, на якій необхідно розмістити занурювальні насоси.

Потенційна максимальна теплова потужність геотермальної системи для розглянутих варіантів підтримуваного рівня шахтних вод (табл. 3) буде достатньою для забезпечення теплом від 23 400 до 80 100 м<sup>2</sup> житлових приміщень та гарячим водопостачанням від 520 до 1780 осіб, що відповідає кільком багатоповерховим будинкам. У табл. 3 прийнято:  $q_{max}$  – створювана теплова потужність з урахуванням втрат тепла 10%,  $S_{min}$  – мінімальна опалювана площа,  $N_{min}$  – мінімальна кількість осіб, забезпечених гарячим водопостачанням,  $E_a$  – вироблена теплова енергія протягом року, МВт год,  $E_s$  – витрати електроенергії на експлуатацію

геотермальної системи (підйом води та теплові насоси), МВт год.

Варіанти «1» та «1а» з більшою глибиною водовідбору попередньо можна визначити як дещо більш енергетично доцільні, ніж «2» та «2а» через більше (до 4%) відношення отриманої теплової енергії до витраченої електричної  $E_d/E_s$ ; хоча більш глибокий порівняльний аналіз потребує зіставлень на основі теплового еквіваленту електричної енергії, уведеного авторами у [17].

Зазначимо, що застосування варіанту «1» буде економічно доцільніше порівняно з варіантом «2» лише за наявності біля водовідливу шахти потужного споживача теплової енергії. Отримані результати показують, що за допомогою запропонованої методики розрахунку стає можливим визначати рівень шахтних вод, який доцільно

підтримувати для заданого режиму теплоспоживання, тобто досягти оптимального суміщення водовідливу у часі з роботою геотермальної системи та освоєнням теплової енергії споживачем. Обмежувальною умовою цієї технологічної схеми є підтримування рівня шахтних вод нижче його гідродинамічно безпечної межі.

Загальна кількість виробленої протягом року теплової енергії при сезонному та цілорічному водовідливі практично однакова для варіантів «1» та «1а» (рис. 3). Однак при сезонному водовідборі протягом 5 місяців опалювального сезону (варіант «1») кількість виробленої за цей період теплової енергії у 2,4 рази більша порівняно з варіантом «1а», що є більш раціональним для закладів комунального господарства. З іншого боку, при постійному водовідборі при варіанті «1а» залишається можливість виробляти до 242 кВт тепла на гаряче водопостачання, тоді як при варіанті «1» у цей період геотермальна система взагалі не працює.

**Висновки.** Запропонована в роботі методика оцінки показників використання геотермального потенціалу затоплених шахт при різних технологічних варіантах водовідбору заснована на встановленні температури шахтних вод під впливом інфільтрації, гідравлічного перетікання, припливу підземних вод та теплового поля Землі. Апробація методики виконана для гірничо-гео-

логічних и технічних умовах гідравлічно поєднаної Селидівської групи шахт. Розглянути варіанти періодичного (протягом опалювального сезону) та постійного протягом року водовідливу на шахті № 2 «Новгородівська» при різних рівнях шахтних вод нижче гідродинамічно безпечної межі.

Відношення отриманої протягом року теплової енергії до електроенергії, що витрачається на експлуатацію геотермальної системи оцінюється у 3,48–3,62. При водовідборі протягом тільки опалювального періоду кількість виробленої за цей час теплової енергії оцінюється у 2,4 рази більше порівняно з цілорічним водовідбором. Разом з тим, у період між опалювальними сезонами при цілорічному водовідборі існують можливість створити теплову потужність до 242 кВт для потреб гарячого водопостачання.

За допомогою розробленої методики стає можливим визначення рівня шахтних вод, який необхідно підтримувати для існуючих місцевих потреб у теплової енергії. Це дає можливість домогтися оптимального суміщення водовідливу з роботою геотермальної системи та освоєнням теплової енергії споживачем. При цьому обмежувальною умовою цієї технологічної схеми є підтримування рівня шахтних вод нижче його гідродинамічно безпечної межі.

#### Список літератури:

1. Полуніна О., Балан С. Вугільна реформа: концепція змінилася. (2021). Отримано з <https://ua.boell.org/uk/2021/01/26/vugilna-reforma-koncepciya-zminilasya>
2. Голубева Ю. Ситуация в угольной отрасли Украины. (2020). URL: <https://112.ua/statji/orzhel-posovetoval-detyam-shahterov-ne-idti-po-stopam-roditeley-pochemu-vlast-reshila-likvidirovat-shahty-522909.html>
3. LANUV NRW: Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie warmes Grubenwasser – Fachbericht 90. Recklinghausen, 2018. 154 p.
4. Loredó, C., Roqueñí, N., & Ordóñez A. (2016). Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. *Int J of Coal Geology*, 164, 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
5. Gillespie, M. R., Cran, E. J., & Barron, H. F. (2013). Deep geothermal energy potential in Scotland British Geological Survey Geology and Landscape. *Scotland Programme. Commissioned Report Cr*, 12(131), 125 p.
6. Ramos, E., Breede, K., & Falcone, G. (2015). Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects. *Environ Earth Sci*, 73, 6783–6795. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>.
7. Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A., & Burnside, N. (2019). Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 29–50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0094-7>
8. Burnside, N. M., Banks, D., & Boyce, A. J. (2016). Sustainability of thermal energy production at the flooded mine workings of the former Caphouse Colliery, Yorkshire, United Kingdom. *Int J Coal Geol*, 164, 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.03.006>
9. Rambabu K., et al., (2020) Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook. *Environmental Science and Ecotechnology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.es.2020.100024>
10. Беседа Н.И., Сляднев В.А., Яковлев Е.А. Информационный бюллетень о региональных техногенных изменениях экологического состояния геологической среды Донбасса под влиянием горных работ. ГПП «Геопробноз». Киев. 1995. 66 с.

11. Улицький О.А., Єрмаков В.М., Луньова О.В., Бойко К.Є. До питання оцінки прогнозу змін гідрогеологічних умов техноекосистеми Селидівської групи шахт. *Екологічна безпека та природокористування*. 2019. № 4 (32). С. 32–42.
12. Rudakov, D., Westermann, S. Analytical modeling of mine water rebound: Three case studies in closed hard-coal mines in Germany. *Mining of Mineral Deposits*, 2021, 15(3), 22–30. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining15.03.022>
13. Гордиенко В.В. Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. Тепловое поле Донбасса. *Геофизический журнал*. 2015. № 6. С. 3–23.
14. Лапшин А.А. Промышленные исследования микроклимата и состояния проветривания горных выработок в глубоких рудных шахтах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 1. С. 76–79.
15. Тихомиров А.К. Теплоснабжение района города: учеб. пособие. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. 135 с.
16. Ишлинский А.Ю. Политехнический словарь. М. : Советская энциклопедия, 1989. 656 с.
17. Rudakov D., Inkin O. (2021). Validation of the operation efficiency criteria for geothermal probes in flooded mine workings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, p. 100–105. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/20215/100>

### **Rudakov D.V., Inkin O.V. A RATIONALE OF PERIODIC WATER WITHDRAWAL FROM FLOODED MINES FOR UTILIZATION OF THEIR GEOTHERMAL POTENTIAL**

*This study aims to substantiate the rational parameters of mine drainage for utilization of mine water as a source of low-potential thermal energy. The system of hydraulically connected mines of Selidovo group with water hoisting in one of them (mine nr. 2 "Novogrodivs'ka") with the potential subsequent use in a geothermal system for heating and hot water supply is considered as the case study. The thermal potential of flooded mines is estimated based on mixing waters of different temperatures coming with infiltration, hydraulic flow from neighboring mines, and groundwater inflow considering the geothermal gradient of the Earth's thermal field.*

*Within the framework of comparative predictive analysis on the effectiveness of various technological options for mine drainage, combined with mine water heat recovery, the drainage of mine nr. 2 "Novogrodivs'ka" was considered for the time-dependent and steady-state mine water level at different elevations. A quantitative comparison of main indicators of drainage and geothermal system performance was carried out assuming the mine water level maintained 26–35 m and 10–20 m beneath the hydrodynamically safe level, with drainage either during the heating period of 5 months or throughout the year. It has been shown that water abstraction at a lower position of the mine water level allows to produce more thermal energy, although with higher electricity consumption for water transportation and running heat pumps. The ratio of thermal energy produced during the year to the total electricity consumed by the running geothermal system is estimated at 3,48–3,62.*

*Applying the developed methodology, it is possible to evaluate the mine water level that should be maintained for the existing demands on thermal energy. This enables achieving an optimal timing combination of drainage with geothermal system operation and the actual exploration of thermal energy by consumers. Thus, the study novelty consists in the proposed coincidence in time of water abstraction and mine water heat recovery during the heating season, which makes it possible to optimize the local energy balance with the spends on mine drainage and profits of generated thermal energy during the year.*

**Key words:** mine water, water abstraction, heat flux, geothermal systems, pumps, heat supply.

**Sadovenko I.O.**

Dnipro University of Technology

**Zahrytsenko A.M.**

Dnipro University of Technology

**Tymoshchuk V.I.**

Dnipro University of Technology

**Dereviahina N.I.**

Dnipro University of Technology

## HYDROMECHANICAL PARAMETERS OF SAFE COAL SEAM EXTRACTION WITHIN A ZONE OF FLOODED MINE WORKINGS EFFECT

*The article substantiated of rational parameters of a barrier safety pillar using an example of real mining and technical situation near the flooded 1st southern stope of the seam l21 of the southern slope of the Dobropil'ska mine of Industrial-Structural Enterprise "Colliery Group Dobropil'ske" for safe development of ventilation drift of the adjacent 2nd southern stope of the seam l21.*

*Parameters of safety pillar stability and risk of filtration water influx considering the changes of filtration, capacity, and geomechanical properties of a rock massif in time are qualitatively estimated. The estimation is based on a synthesis of models of non-stationary filtration in finite differences and profile finite-element hydrogeomechanical model of discrete medium.*

*It is established that the developed and flooded field of stopes has a lasting draining influence on coal-waste rock massif, while creating lowered values of pressures within the developed areas. In addition, permeability parameters of collapsed rocks approach the natural values in a process of their gravitational densification for 25 years. For sizes of a safety pillar with width of 20 and 5 meters water inflows from the side of the flooded field have a secondary value and are 8...17% of the total drainage of a new stope under design. During this, the risks of water influx from stratified zones of a roof of contiguous coal seam are present, where zones of the most intense crack loosening are formed in the interval of rock interlayer at joints of preparatory workings.*

**Key words:** hydrogeomechanical processes, flooding, barrier safety pillar, modelling, water inflow, deformations.

**Formulation of the problem and analysis of recent studies and publications.** Along with the problems concerning predictable and controllable hydrodynamical mode to close down mines and flood them [1–5] as well as the use of their alternative water resource [6–8], the problems of mining within a zone of flooded workings, controlled by normative documents, remain topical. According to the Instruction on the safe mining in the neighbourhood of the flooded mine workings, Ukraine implements two techniques to provide water inrush safety. Technique one involves safety pillar remained between flooded mine workings and mine workings being driven; technique two involves unwatering of the flooded mine workings plus implementation of measures in the context of specific project. Safety pillar width is calculated according to analytical dependence where

the pillar geometry is determined by means of the extracted seam thickness, depth, and the flooded mine working extension. However, the above involves neither filtration parameters nor capacity parameters of the pillar rocks and the flooded formation or water pressure values.

Analysis of actual data concerning parameters of safety coal pillars and their state, performed by [7–9], shows that calculations on the technique involves insupportable reliability margin resulting in the groundless losses of the mineral. Additional reserve of the pillar stability has been confirmed by authors of [10–13] while substantiating a modified criterion of a peak filtration pressure effect on a safety pillar according to which normative mechanism of water pressure shear effect cannot correspond to actual data resulting in up 10 times excess of project dimensions

(or actual ones) of a pillar against the required geometry.

Thus, the problem to identify optimum pillar geometry within the flooded mine workings effect remains topical requiring parameter substantiation taking into consideration temporal changes in filtration and capacity properties of rock mass as well as in its geomechanical properties since on the one hand, it provides safe mining, and its completeness on the other hand. *Objective* of the work is to substantiate rational parameters of a safety pillar in terms of actual mining situation in the neighbourhood of the flooded southern longwall of  $l_2^1$  seam of southern slope of *Dobropolskaia* mine (Production structural subdivision *ShU Dobropolskoie*) to drive safely ventilation drift for contiguous southern longwall 2 of  $l_2^1$  seam. In line with the objective, a *problem* of quantitative estimation as for the pillar stability as well as a risk of filtration water inrush has been solved relying upon synthesis of models of nonstationary filtration in terms of finite differences (*Stage 1*), and a profile finite-element hydromechanical model (*Stage 2*).

**Experimental part.** Both filtrational and capacity parameters of rock mass are the key uncertainty while solving hydrodynamical prognostic problems since, in the context of natural rock occurrence, the parameters experience their areal changes then being subject to temporal variations during each process cycle taking place when a mine functions. Inverse solution while developing a target filtration model of a mine field is the most acceptable technique to determine their variational regularities.

*Stage 1.* To identify prognostic water inflows as for the mine working, locating within an area of worked-out and flooded sites effect, *numerical geofiltrational model* of the mine field site has been developed. The model has been implemented with the help of finite differences method using MODFLOW software system. A model of three-dimensional flow of constant-density underground water within porous

medium is described using the partial differential equation

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

where  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$ , and  $k_{zz}$  are hydraulic (filtrational) conductivities towards X, Y, and Z coordinate axes;  $h$  unknown water pressure function (L);  $t$  is time (T);  $W$  is unit flow capacity:  $W > 0$  is for incoming flow, and  $W < 0$  is for outgoing flow; and  $S_s$  is specific capacity of porous medium ( $L^{-1}$ ).

Together with boundary conditions and initial conditions, equation (1) describes three-dimensional nonstationary flow of underground water within heterogeneous and anisotropic mediums if the main directions of vectors of hydraulic conductivities coincide with the coordinate axes directions.

In the plan, the study area, being of 2000×2500 m dimensions, has been approximated by means of a net domain with 50×50 pitch; it represents both hydrodynamic and mining-technical situation of the southern sloped share of contiguous seams  $l_3$  and  $l_2^1$  within 450 m level in *Dobropolskaia* mine as of the year of 2018.

Each of the nodes reflects seam hypsometry, filtration parameters and capacity parameters of water-bearing levels as well as separating formations (Tables 1, and 2), and initial position of underground water level.

According to its geological structure and hydrogeological conditions, the filtration area is schematized vertically by means of 11 simulation layers covering following water-bearing levels and aquitards (Fig. 1): Layer 1 is water-bearing level of the Neogene-Quaternary deposits; Layer 2 is averaged formation with argillite, aleurite, sandstone, limestone, and coal interbedding in 79:18:1:2 percentage ratio; Layers 3 and 5 are water-bearing sandstones; Layer 4 is argillite-aleurite aquitard;

Table 1

Initial values of the model filtration parameters

Filtration coefficient ( $K_\phi$ ), [m/day] of rocks (formation percentage)				
Limestone (1%)	Sandstone (18%)	Coal (2%)	Argillite and aleurite (79%)	Average weighted in terms of X and Y axes; within brackets – in terms of Z axis
Coal-bearing formation with 50–150 m depth from overburden floor				
0.25–2.0	0.3	0.3	0.005	0.077 (0.006)
Coal-bearing formation with 150–300 m depth from overburden floor				
0.20–0.75	0.1	0.1	0.003	0.028 (0.004)
Coal-bearing formation with 300–500 m depth from overburden floor				
0.2	0.04	0.07	0.002	0.011 (0.0025)
Coal-bearing formation with more than 500 m depth from overburden floor				
–				0.007 (0.0013)

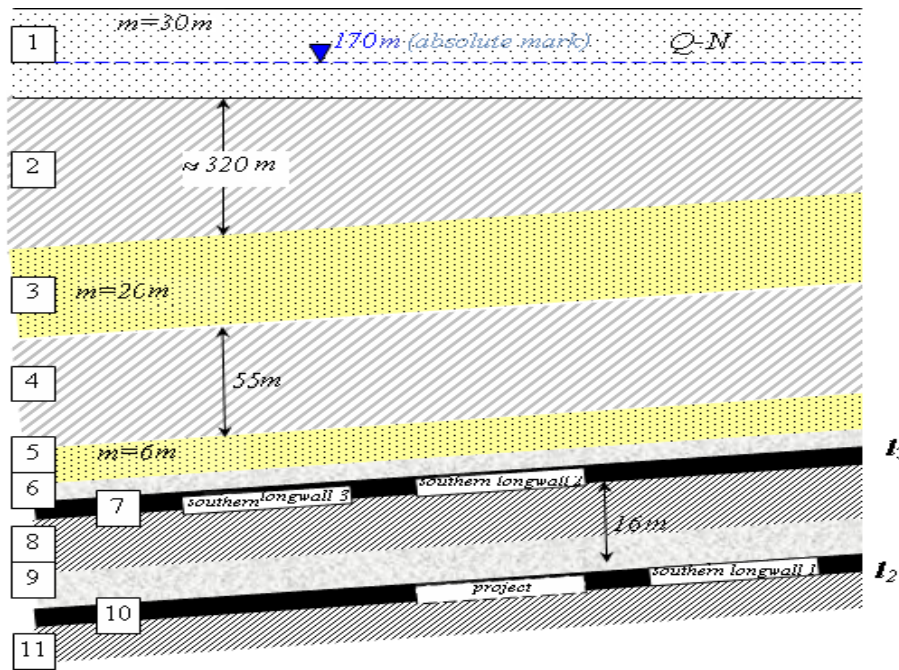


Fig. 1. Schematic view of the formation being modeled

Layers 6 and 9 are argillite aquitards; Layers 7 and 10 permeable coal seams  $l_3$  and  $l_2'$  respectively; and Layers 8, and 11 are aleurite aquitards.

Table 2

Initial capacity parameters of the model [%]

Simulation layers	Gravitational capacity	Elastic capacity
Overburden (simulation layer 1)	20	0.1
Coal-bearing formation (simulation layers 2-11)	0.1	$8 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3}$

3<sup>rd</sup> type boundaries with the provided supply ( $H = Const$ ), reflecting general nature of underground water inflow/outflow within the studied area, have been given as external hydrodynamic boundaries of simulation layer 1 of the Neogene-Quaternary deposits. Water pressure values within the model boundaries have been taken in accordance with watermarks, determined by exploratory drilling; they vary within 147–178 m. Thickness of the aquifer is 10 m.

Boundary conditions of a coal-bearing formation (i.e. simulation layers 2–11) are of the same type; at the northern boundary they are preset in the formed of a 3<sup>rd</sup> type remote boundary ( $H = Const$ ) characterizing the deposit baseting to overburden with such water pressure values as 162–178 m.

Conductivity within external lines of the simulation layers has been determined relying upon the averaged

values of their filtration characteristics within the area being modeled.

Mine workings of  $l_3$  and  $l_2'$  seams, being drainage line ( $H = Const$ ) with known (preset) lowering level of underground water at a mark of coal seams floor (simulation layers 7 and 10), are internal boundaries of the model.

The represented model structure makes it possible to take into consideration hydraulic connection between coal-bearing formation and overburden as well as to estimate quantitatively the disturbed model of underground water in the context of the worked-out southern sloped share of mine field and its share planned to be mined.

Particularity of the current problem is to estimate water balance within a local site of the mine field which hydrodynamic situation depends upon the development of contiguous (18–22 m) coal seams  $l_3$  and  $l_2'$  within a zone of flooded mine workings effect.

$l_3$  seam, located in the southern sloped share, was mined from 1959 till 1992. Southern longwall 3 (Fig. 1) was mined in 2017-2018; a pillar with up to 37 m width was remained in the neighbourhood of the flooded mine workings of southern longwall 2 (1991–1993 extraction period). When the longwall was mined under such conditions, water inflows were registered in the form of seepage from the seam roof within certain sites only.

Southern sloped share of  $l_2$  seam was under mining from 1969 till 1990; southern longwall 1



within 450 m level was extracted from 1989 till 1990; water inflows demonstrated themselves in the form of seepage and currents (up to 1.0 m<sup>3</sup>/hour rate). Since 2005, belt road has been isolated; mine workings and development workings have been flooded; access to them is not available. Up to the year of 2005, water inflow with up to 20 m<sup>3</sup>/hour rate was registered within the mine field site.

As of August 2018, water inflow into a water collector of the end slope from the southern side of  $l_2^I$  seam was 15 m<sup>3</sup>/h; in terms of  $l_3$  seam, it was 7 m<sup>3</sup>/h.

The described actual hydrodynamical situation has been simulated to identify and determine both capacity parameters of the disturbed rock mass and filtrational ones. Lines of the worked-out longwalls are preset in the form of drains with 10 m<sup>2</sup>/day simulation capacity of the rock mass corresponding to 0.004 m/day value of filtrational permeability.

According to inverse solutions, imbalance of geofiltrational model is not more than 1.48 m<sup>3</sup>/day; relative error is 0.02%. Value divergence between model water inflows and actual ones is up to 4.6 m<sup>3</sup>/hour.

The model has been identified to real conditions; water transmissivity for mined-out space of longwalls is 0.08 to 0.1 m<sup>2</sup>/day; gravitational capacity of broken rocks is  $\mu = 0.3$ ; and elastic filtration characteristic is  $\mu^* = 10^{-5}$ .

Inverse epignosis solution has helped determine following regularities of the disturbed rock mass:

1) southern longwalls 1 and 2, mined-out previously in terms of  $l_2^I$  and  $l_3$  seams within southern slope, keep exerting their drainage action on the coal rock mass developing lowered water pressure values inside of the mined-out sites of 450 m level;

2) water pressure values within the flooded area (7–13 m) form water inflows of 20–30 m<sup>3</sup>/h rate; they are determined using water discharge characteristics in the context of complicated inclined occurrence of coal seams. With that, local backwater is formed within hypsometrically lowered sites of extraction pillars; and

3) filtrational parameters of the disturbed rocks within the mined-out sites of a mine field are characterized by values being proximal to natural ones which can be explained by their gravitational 25–29 year compaction starting from the moment of extraction of southern longwalls 1 and 2 ( $l_2^I$  and  $l_3$  seams).

The prognostic modeling involved qualitative estimation of values of water inflows towards southern longwall 2 upon availability of a safety pillar and without it within a zone where the flooded mine

workings of  $l_2^I$  seam take action. The calculations were performed in terms of nonstationary filtrational mode when average face advance is 100 m/month.

Formation of water inflows towards the projected longwall 2 of  $l_2^I$  seam if safety pillar is available takes place mainly at the expense of capacity reserves within the coal seam roof; it takes place partially (i.e. 8 to 17%) at the expense of a water inflow through a safety pillar from the mined-out longwall 1 of seam  $l_2^I$ . Thus, the water inflows towards the projected longwall vary during the whole period of mining operations (i.e. 10 months) from 3.72 to 14.07 m<sup>3</sup>/h if safety pillar is available, and from 2.88 to 11.18 m<sup>3</sup>/h if not (a development drift was driven by means of coal-cutting with stone similarly to the southern longwall 1). In this context, for the considered variants, water inflows from the mined-out of the extraction pillar of longwall 1 of seam are  $l_2^I$  0.65–1.16 and 0.39–1.03 m<sup>3</sup>/h respectively.

If safety pillar is not available, then the lowered values of the prognostic water inflows from a mine field of the flooded longwall can be explained by low water pressure values formed within a line of a southern belt road of the mined-out longwall under the effect of the current drainage and specific features of inclined occurrence of the coal seam.

*Stage 2.* Stress-strain state of barrier (or safety) pillar rocks within a zone, effected by the flooded mine workings, depends upon the pillar geometry, and characteristics of enclosing rock mass determining its filtrational permeability as well as a value of water inflows. Hence, joint solution of hydrodynamic and geomechanical problems to evaluate its hydrogeomechanical operational state in terms of out-of-limit deformations has been simulated using profile model of a mine field site where the results of scheduled filtration, concerning water pressure fields around mine workings, have been applied.

Basic differential equation of the profile filtration, used by finite-element formulation of PHASE2 software system, is

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (2)$$

where  $H$  is water pressure;  $k_x$  and  $k_y$  are hydraulic (i.e. filtrational) conductivities towards coordinate axes  $X$  and  $Y$ ;  $Q$  is the flow rate at the boundary;  $t$  is time;  $m_w$  is a coefficient of changes taking place in the capacity; and  $\gamma_w$  is specific water weight.

Application of a method of weighted residuals of Galerkin to the differential equation (2) helps generate such a finite-element expression to describe two-dimensional filtration

$$\tau \int_A ([B]^T [C][B]) dA \{H\} + \tau \int_A (\lambda <N>^T <N>) dA \{H\},$$

$$t = q \tau \int_L (<N>^T) dL \quad (3)$$

where  $[B]$  is gradient matrix;  $[C]$  is a matrix of hydraulic (i.e. filtrational) conductivities of the elements;  $\{H\}$  is nodal water pressure vector;  $<N>$  is a vector of interpolational functions;  $q$  is unit rate through the element line;  $\tau$  is the element thickness;  $t$  is time;  $\lambda$  is capacity parameter for nonstationary filtration being equal to  $m_w \gamma_w$ ;  $A$  is a symbol to sum up in terms of the element area; and  $L$  is a symbol to sum up in terms of the element line.

Compactly, the filtrational equation for finite element is

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}, t = \{Q\}, \quad (4)$$

where  $[K]$  is a matrix of the element properties;  $[M]$  is a matrix of the element masses; and  $\{Q\}$  is a vector of a flow rate within the element.

Equation (4) is a general form of finite-element equation of nonstationary filtration within the profile model.

Geomechanical state of coal rock mass within the area of the planned extraction of the southern longwall 2 of seam  $l_2'$  was evaluated for characteristic section being perpendicular to the strike of extraction pillars within seams  $l_2'$  and  $l_3$  (Fig. 1)

Geostatic pressure, corresponding to the mining depth in terms of  $l_2'$  seam extraction by means of the southern longwall 2, depended upon the weight of overlying rock formation within the model upper line. Values of physical and mechanical characteristics of the rock layers were taken according to the data of the mine field prospecting.

The stope was modeled with the help of the known level of the mined-out space rock deformation corresponding to 1.2 being a coefficient of the immediate roof loosening.

The profile hydrodynamical model was patterned relying upon the data of solving target-spatial filtration problems where constant water pressure were defined within a line of the area under modeling as well as drainage lines within both mined-out and projected extraction pillars.

Prognostic modeling of stress-strain state of the disturbed rock mass has been performed for extraction conditions of the southern longwall 2 with 40, 35, 30, 25, 20, 15, 10 and 5 m pillar width from the flooded belt road of the southern longwall 1 of seam  $l_2'$ .

Evaluation of the water inflows, formed from the flooded mine workings, involves the conditions when drainage either is not available or it is limited within

a line of the southern belt road 1; high filtration permeability of the caved rocks within the mined-out area (i.e. up to 1 m/s) has already been considered.

When the projected longwall was mined, stress-strain state of the rock mass at the territory of the safety pillar was controlled with the help of values of movements, deformations, and stresses within the rock mass as far as the line of the development mine working of the southern longwall 2 approached the mined-out area of longwall 1 of the seam  $l_2'$ . Evaluation of the rock mass geomechanical state with the help of the 3 model involved the effect of distribution of water pressures which values were obtained at the stage of profile hydrodynamical problems solving in terms of different widths of the barrier pillar.

Fig. 2 demonstrates a character of out-of-limit deformation of coal rock mass for those solution variants where widths of the barrier pillar were 35, 20, and 5 meters. Out-of-limit rock deformation involvement into the barrier pillar neighbourhood takes place within a roof in the range of 45-65 m of the coal seam being mined. Formation of excessive fissuring zones within the ranges results in the decreased water pressures from the flooded belt road of the southern longwall 1.

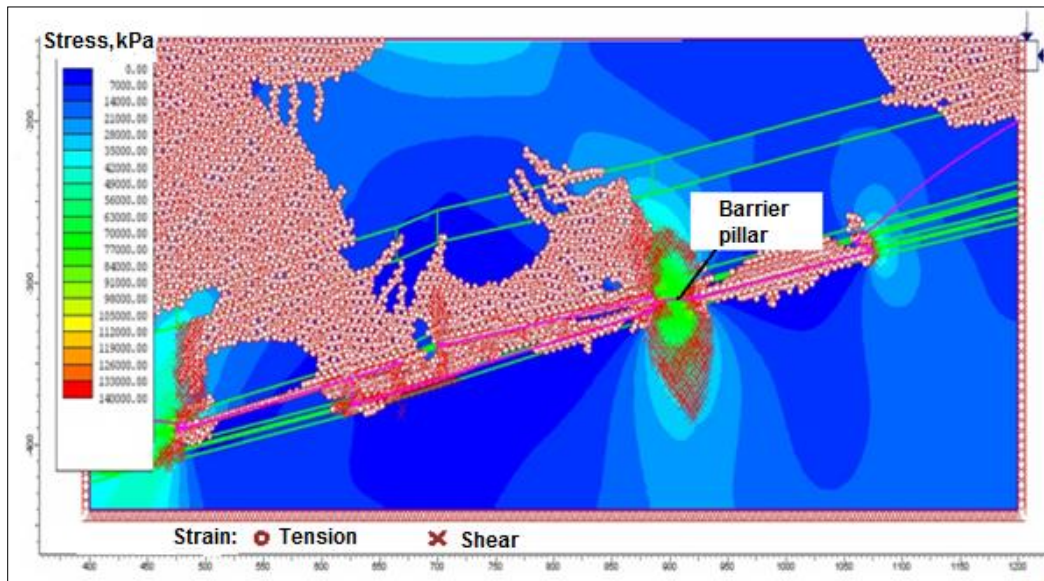
Within the barrier pillar, progress of out-of-limit deformation zones is observed in the range of the edge areas of the coal seam at the depth of down to 10.0 m; closure of the zones takes place when the barrier pillar is less than 20.0 m. thus, out-of-limit deformation zones and subsequent increase in the barrier pillar permeability happen if its width is less than 20.0 m.

In the context of the numerical model, effect of out-of-limit deformation on the filtration processes through a barrier pillar has been estimated by means of 2 to 10 times increase in the coal seam permeability to compare with its natural permeability [14–16].

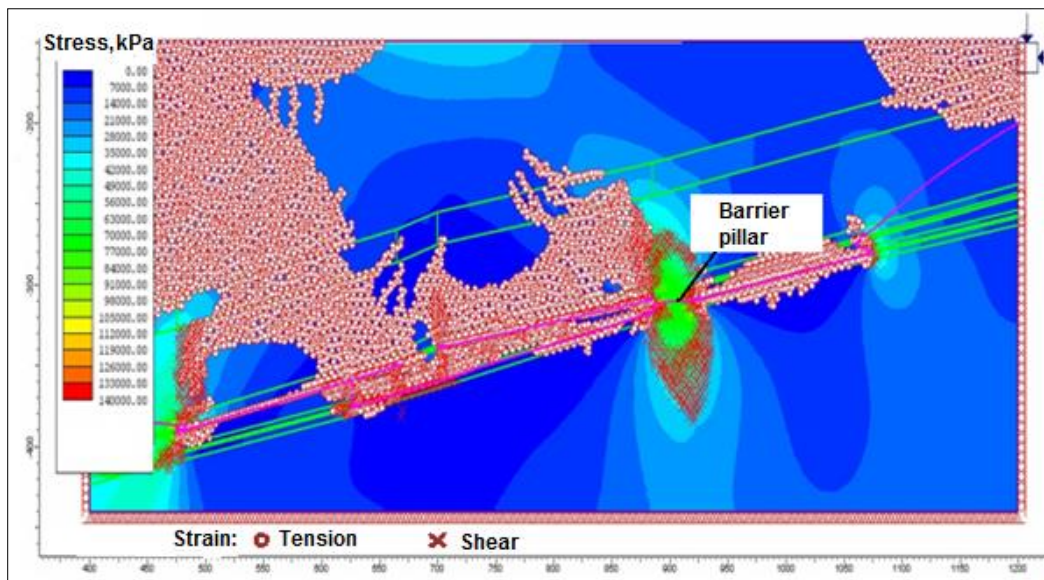
Fig. 3 demonstrates the results of calculations, concerning water inflows formed through the barrier pillar depending upon its permeability values (filtration coefficient is 0.07, 0.14, and 0.7 m/day).

It should be noted that if permeability of the barrier pillar is maximal, decrease in its width (Fig. 3) cannot result in significant water inflow increase. That is connected with maximum consumption of a resource of the formed water inflows from the flooded belt road of the southern longwall 1 of seam  $l_2'$ .

Availability of unfilled flooded cavities, containing free water, within a junction area of previously mined-out southern longwalls 1 and 2 of seam  $l_3$  is a source of additional water inflow to a line of the projected ventilation drift within seam  $l_2'$  [17–20].



a



b

Fig. 2. Forming zones of out-of-limit deformation of coal rock formation if barrier pillar width is 35 (a) and 5 (b) meters

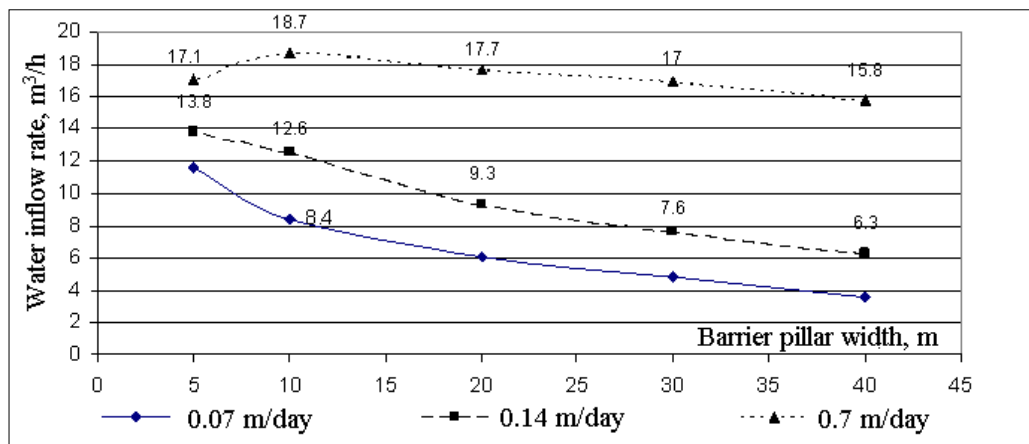


Fig. 3. Forming prognostic water inflows in terms of different widths of the barrier pillar and its permeability levels

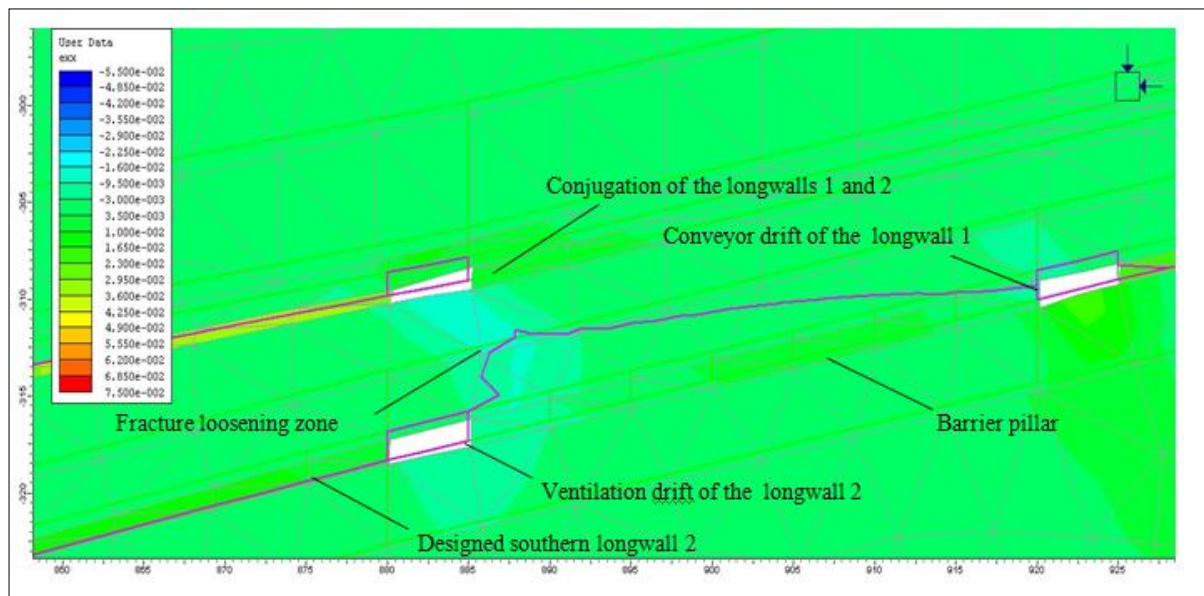


Fig. 4. The field of relative horizontal deformations when conjugation site of the 1st and 2nd southern longwalls of  $l_3$  seam is undermined by the designed 2nd southern longwalls, as a fraction, barrier pillar width 35.0 m

Under the conditions, the progress of out-of-limit deformation, followed by the formation of aquiferous fissures within undermining site at the boundary of southern longwalls 1 and 2 of  $l_3$  seam, is the key factor determining formation of water inflows to the projected mine working.

Analysis of stress-strain state modeling, in terms of various relative positions of boundaries of southern longwalls 1 and 2 of  $l_3$  seam, and ventilation drift of the southern longwall 1 of  $l_2^1$  seam shows that location of zones of the most intensive fracture loosening within interval of rock parting is characterized by 10 to 15 m zone under the junction area (Fig. 4).

Location of the projected ventilation drift of the southern longwall 2 of  $l_2^1$  seam out of the area of the most intensive fracture loosening is one of the conditions to decrease formation of water flows in the context of the determined effect of junction boundary of the southern longwalls 1 and 2. That can be achieved by the development and extraction of oblique longwall providing free outflow.

**Conclusions.** When the model of nonstationary filtration in finite differences was brought into coincidence with the profile finite-element hydrogeomechanical model of discrete medium, it has become clear that both mined-out and flooded field of mine workings exerts long-term drainage influence on coal rock mass developing lowered water pressure values within the mined-out sites; moreover, permeability parameters of the caved rocks approach natural values during their during their 25-year gravitational compaction. If pillar width is 20 and 5 m then water inflows from the flooded field are of subordinate value being 8 to 17 % of total drainage by a new projectable longwall. In this context, water inrush risk from stratified areas of a contiguous coal seam roof is possible where zones of the most intensive fracture softening are formed. That may be prevented while developing and mining of oblique longwalls with standard slope for water discharge.

#### References:

1. Sadovenko, I., Zahrytsenko, A., Podvigina, O., Dereviahina, N., & Brzeźniak, S., 2018. Methodical and Applied Aspects of Hydrodynamic Modeling of Options of Mining Operation Curtailment. *Solid State Phenomena*, Vol. 277, pp. 36–43. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.36>
2. Hrinov, V.G., Khorolskyi, A.A., 2018. Improving the process of coal extraction based on the parameter optimization of mining equipment. *E3S Web of Conferences: Ukrainian School of Mining Engineering*, Vol. 60, pp. 1–10.
3. Loredó, C., Roqueñí, N., Ordóñez, A., 2016. Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use. *International Journal of Coal Geology*, 164, pp. 115-122. DOI: 10.1016/j.coal.2016.04.013
4. Sadovenko, I., Inkin, O., Zagrytsenko, A., 2016. Theoretical and geotechnological fundamentals for the development of natural and man-made resources of coal deposits. *Mining of mineral deposits*, 10 (4), pp. 1–10. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.001>.

5. Falshtynskyy, V., Dychkovskyy, R., Lozynskyy, V., & Saik, P., 2012. New method for justification the technological parameters of coal gasification in the test setting. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 201–208. <https://doi.org/10.1201/b13157-35>
6. Goerke-Mallet, P., Drobniowski, M., 2013. Planning long-term mine-water management for the Ibbenbüren coal basin. *XV International ISM Congress, Aachen (International Societz for MineSurvezing)*, pp. 319–324.
7. Педченко С. В., Шиптенко А. В. Опыт ведения горных работ у затопленных выработок Наукові праці УкрНДМІ НАН України, N 9 (I), 2011. С. 80–88.
8. Belmas, I., Kolosov, D., 2011. The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. *Technical and Geoinformational Systems in Mining: School of Underground Mining 2011 [online]*, 211–214.
9. Vervoort, A., Declercq, P.-Y., 2018. Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of underground workings. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(1), pp. 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.11.008>
10. Sadovenko, I.A., Demchenko, Yu.I., & Ulitski, O.A., 2003. Evaluation of geomechanical stability of inter-mine pillars. *Collection of scientific papers of NMU*, 1(17), pp. 40–43.
11. Napa-García, GF & Navarro Torres, 2017. Applicability of failure strain for the stability evaluation of square pillars in room and pillar mining. *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Australian Centre for Geomechanics, Perth*, pp. 557–565. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1710\\_45\\_Napa-Garcia](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1710_45_Napa-Garcia)
12. Gao, W. & Mingming, G., 2016. Stability of a coal pillar for strip mining based on an elastic-plastic analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 87, pp. 23–28. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.05.009
13. Kolosov, D., Dolgov, O., Bilous, O., Kolosov, A., 2015. The stress-strain state of the belt in the operating changes of the burdening conveyor parameters. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 585–590.
14. Садовенко І.А., Прокопенко Т.Д., Южакова Р.А., Тишков В.В. Моделирование проницаемости тампонажной зоны вокруг горных выработок. *Науковий вісник НГУ*. № 3. С. 8–11.
15. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., Demchenko, Y., 2019. Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), pp. 53–62. DOI: 10.33271/mining13.04.053
16. Celik, Fatih (2019). The observation of permeation grouting method as soil improvement technique with different grout flow models. *Geomechanics and Engineering*, 17(4), 367–374. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.4.367>
17. Sadovenko, I., Tymoshchuk, V., 2013. Hydrogeodynamics of the contact surface “lining-saturated rocks” in opening mine working. *Mining of Mineral Deposits*, pp. 85–90.
18. Развитие процессов подтопления земной поверхности под влиянием закрывающихся шахт / В.Н. Ермаков, А.П. Семенов, Р.А. Улицкий, Е.П. Котелевец, А.В. Тарахало. *Уголь Украины*. № 6. 2001. С. 12–14.
19. Barnett, B., Townley, L., Post, V., Evans, R., Hunt, R., Peeters, L., Richardson, S., Werner, A., Knapton, A., & Boronkay, A., 2012. Australian groundwater modeling guidelines. *Waterlines Report Series*, 82, 204.
20. Otto, C., & Kempka, T., 2017. Prediction of Steam Jacket Dynamics and Water Balances in Underground Coal. *Gasification Energies*, 10(6), 739.

### **Садовенко І.О., Загриценко А.М., Тимошук В.І., Деревягіна Н.І. ГІДРОГЕОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ БЕЗПЕЧНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ В ЗОНІ ВПЛИВУ ЗАТОПЛЕНИХ ВИРОБОК**

*В статті обґрунтовані раціональні розміри бар'єрного цілика на прикладі реальної гірничо-технічної ситуації біля затопленої 1-ї південної лави пласта  $l_2^1$  південного ухилу шахти «Добропільська» ПСП «ШУ Добропільське» для безпечного проведення вентиляційного штреку суміжної 2-ї південної лави пласта  $l_2^1$ .*

*На основі синтезу моделей нестационарної фільтрації методом кінцевих різниць і профільної кінцево-елементної гідрогеомеханічної моделі дискретного середовища кількісно оцінені параметри стійкості цілика і ризик фільтраційного прориву води з урахуванням зміни фільтраційно-ємнісних і геомеханічних властивостей гірського масиву в часі.*

*З використанням чисельного моделювання процесів нестационарної фільтрації в кінцевих різницях визначені прогностні водопритоки в виробку, що знаходиться в зоні впливу відпрацьованих і затоплених ділянок. Оцінка напружено-деформованого стану порід бар'єрного (або охоронного) цілика в зоні впливу затоплених виробок виконана на профільній моделі ділянки шахтного поля, де використані результати рішень задач планової фільтрації з формування поля напорів навколо гірничих виробок.*

*Встановлено, що відпрацьоване і затоплене поле очисних виробок має тривалий дренажний вплив на вуглепородний масив, створюючи знижені значення напорів в межах відпрацьованих ділянок, а параметри проникності зрушених порід наближаються до природних значень в процесі їх гравітаційного ущільнення протягом 25 років. При розмірах цілика шириною 20 і 5 метрів водопритоки з боку затопленого поля мають другорядне значення і становлять 8 ... 17% від загального притоку до нової лави. При цьому ризики прориву води існують з розширених зон покрівлі зближеного вугільного пласта, де в інтервалі породного міжпласта на сполученні підготовчих виробок формуються зони найбільш інтенсивного тріщинного розпушення.*

**Ключові слова:** *гідрогеомеханічні процеси, затоплення, бар'єрний цілик, моделювання, водоприток, деформації.*

# ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 678.046.9

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/30>**Голуб Л.С.**

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Ващенко Ю.М.**

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

## АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОДРІБНЕНИХ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ

Зростання обсягів світового виробництва і споживання полімерних та еластомерних матеріалів обумовлює постійне збільшення та накопичення відходів, що утворюються як в процесі виробництва, так і в процесі їх перероблення. Конструкційні матеріали на основі еластомерів широко застосовуються в техніці, при цьому до 80% питомої ваги гумових відходів складають відпрацьовані автомобільні шини. Накопичення великого обсягу цих відпрацьованих виробів створює значну проблему як в екологічному, так і виробничому аспектах. Невідновлюваність природної нафтової сировини приводить до необхідності вирішення проблеми використання вторинних ресурсів з їх максимальною ефективністю. Проблема використання зношених шин має також істотне економічне значення, оскільки потреби господарства в природних ресурсах безупинно ростуть, а їхня вартість постійно підвищується. Перероблення відпрацьованих гумових виробів, з подальшим використанням продуктів перероблення в рецептурах готових еластомерних виробів дозволить значно знизити вартість виготовляємої продукції. Крім того, зменшення кількості накопичених відпрацьованих гумових виробів значно покращить екологічну ситуацію в країні. Метою роботи був пошук нових сокомпонентів для модифікуючих систем вітчизняного виробництва, які застосовуються для оброблення поверхні подрібненого вулканізату. Це також є актуальним питанням для розширення асортименту добавок на основі сірковмісної фенолформальдегідної смоли октофор 10S для модифікації подрібнених продуктів переробки відпрацьованих гумових виробів. Як об'єкти дослідження застосовували продукти механічного подрібнення зношених гумових виробів, зокрема шин, а також продукти подрібнення гумотехнічних виробів. Виходячи з результатів попередніх досліджень, для оброблення поверхні подрібненого вулканізату застосовано сплави на основі фенолформальдегідного олігомеру – смоли октофор 10S разом з солями, отриманими сполученням похідних етаноламінів та стеаринової кислоти, а також метилового естеру жирних кислот, сировиною був курячий жир. Як аміновмісний компонент досліджено сіль, яку отримано взаємодією триетаноламіну зі стеариновою кислотою. На основі проведених досліджень надано рекомендації щодо практичного застосування подрібненого вулканізату, обробленого активуючими системами з використанням естерів жирних кислот, сировиною для виробництва яких є курячий жир. Розробка цих модифікуючих добавок вітчизняного виробництва дозволить застосовувати в досить великому обсязі подрібнені продукти відпрацьованих гумових виробів, а це в свою чергу буде сприяти вирішенню екологічної ситуації в країні.

**Ключові слова:** ресурсозбереження, еластомерні композиції, фізико-механічні показники, модифікуючі добавки.

**Постановка проблеми.** Зростання обсягів світового виробництва і споживання полімерних та еластомерних матеріалів обумовлює постійне збільшення та накопичення відходів, що утворюються як в процесі виробництва, так і в процесі їх перероблення. Відомо, що більше як 85% відходів утворюються у сфері використання [1]. При цьому конструкційні матеріали на основі елас-

томерів широко застосовуються в техніці, при цьому до 80% питомої ваги гумових відходів складають відпрацьовані автомобільні шини. Накопичення великого обсягу цих відпрацьованих виробів створює значну проблему як в екологічному, так і виробничому аспектах. Проблема використання зношених шин має також істотне економічне значення, оскільки потреби господарства

в природних ресурсах безупинно ростуть, а їхня вартість постійно підвищується. Перероблення відпрацьованих гумових виробів, з подальшим використанням продуктів перероблення в рецептурах готових еластомерних виробів дозволить значно знизити вартість виготовлюваної продукції. Крім того, зменшення кількості накопичених відпрацьованих гумових виробів значно покращить екологічну ситуацію в країні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Невідновлюваність природної нафтової сировини приводить до необхідності вирішення проблеми використання вторинних ресурсів з їх максимальною ефективністю. В цій галузі проводиться дуже багато наукових робіт, в тому числі і науковцями в Україні [2–4]. В зв'язку вищесказаним, дуже важливий розвиток наукових досліджень з метою створення перспективних технологій з утилізації та перероблення відпрацьованих шин у конкурентоспроможні матеріали.

Гума, як конструкційний матеріал до моменту виходу виробу з експлуатації зазнає незначних структурних змін. Наведені в [5] дані свідчать, що основні зміни в гумах в процесі експлуатації відбуваються на рівні макроструктури композиції. Захисні речовини, які є в наявності в матеріалі, призупиняють процеси окиснення та перешкоджають переходу до автокатолітичної фази. При цьому деструктивні процеси, які відбуваються, деяким чином оказують вплив на міцнісні та еластичні властивості, але не викликають глибоких структурних перетворень полімерів, так як протистарювачі, що застосовуються, обривають окислювальні ланцюги на їх початкових ланках. Відсутність значних змін у фізико-хімічній структурі, особливо у шинних гумах, обумовлено також компенсаційним характером процесів деструкції та структурування.

Однак додавання гумової крихти або подрібненого вулканізату (ПВ) до складу еластомерних композицій призводить до істотного зниження їх основних фізико-механічних характеристик. Причиною зниження механічних показників еластомерних композицій є насамперед слабка взаємодія на межі розділу вулканізована поверхня – еластомерна матриця, особливо при використанні подрібненого вулканізату з розміром частинок більше за 0,8 мм, а також поява локальних перенапружень в системі, що прискорює процеси руйнування матеріалу при експлуатації під дією як статичних, так і динамічних навантажень. Для усунення цього недоліку доцільним є поверхнева модифікація подрібнених вулканізаців, яка дозво-

ляє збільшити реакційну здатність їх поверхні та підсилити взаємодію на міжфазних межах. Автором статті раніше проводилися наукові дослідження з вивчення можливості застосування композитів з використанням фенолформальдегідних смол для оброблення поверхні подрібненого вулканізату.

**Постановка завдання.** Метою роботи був пошук нових сокомпонентів для модифікуючих систем вітчизняного виробництва, які застосовуються для оброблення поверхні подрібненого вулканізату. Це також є актуальним питанням для розширення асортименту добавок на основі сірковмісної фенолформальдегідної смоли октофор 10S для модифікації подрібнених продуктів переробки відпрацьованих гумових виробів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Як об'єкти дослідження застосовували продукти механічного подрібнення зношених гумових виробів, зокрема шин, а також продукти подрібнення гумотехнічних виробів. Досліджено подрібнений вулканізац, отриманий механічним подрібненням зношених шин та гумотехнічних виробів при позитивних температурах.

Загальношинний подрібнений вулканізац (гумова крихта), який застосовано в роботі відповідав технічним вимогам ТУ 38 108035-92 та ТУ У 6-25521987.010.2000.

Розмір частинок подрібненого вулканізату, який був використаний в роботі, становив від 0,8 до 5–8 мм. Для порівняння використовували термомеханічний регенерат марок РШТ, РШТН відповідно до ТУ У 6-25521987.009-2000.

Виходячи з результатів попередніх досліджень, для оброблення поверхні подрібненого вулканізату застосовано сплави на основі фенолформальдегідного олігомеру – смоли октофор 10S разом з солями, отриманими сполученням похідних етаноламінів та стеаринової кислоти, а також метилового естеру жирних кислот. Сировиною був курячий жир (МЕЖК-К) (МЕЖК-К було синтезовано на кафедрі технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «УДХТУ»). Наявність активних функціональних груп та достатньо висока поверхнева енергія цих солей дозволяє передбачити можливість застосування їх як сокомпонентів в модифікуючих системах на основі фенолформальдегідних олігомерів. Модифікатори виготовлялися шляхом сполучення компонентів при температурах 120–130 °С. Характеристика сплавів наведена в таблиці 1.

Як аміновмісний компонент досліджено сіль, яку отримано взаємодією триетаноламіну



зі стеариноювою кислотою (СТС) (Добавка надана ТОВ НІК «ЕЛКО», м. Дніпро), а також взаємодією моноетаноламінів з МЕЖК-К (добавку синтезовано на кафедрі хімії та технології переробки еластомерів ДВНЗ «УДХТУ»).

Оброблення поверхні подрібненого вулканізату проводили на валковому обладнанні відповідно до режимів, зазначених в [6].

Оцінку властивостей гумових композицій та кінетику вулканізації визначали на безроторному реометрі MDR-2000 фірми «Альфа Технолоджіс» при амплітуді коливання нижньої форми  $\pm 0,5$  градуси. Розрахунок параметрів проводили за допомогою відповідної програми на ЕОМ. Визначали також тангенс кута механічних втрат як гумової суміші при мінімальному моменті крутіння, так і вулканізату при максимальному моменті крутіння.

Розподіл частинок подрібненого вулканізату за розмірами проводили з використанням аналізатора диспергування наповнювачів цієї ж фірми, аналіз проводили за методиками вказаними в [7].

Введення різних інгредієнтів до еластомерних матеріалів викликає зміну морфологічної структури матриці. Ці зміни при використанні подрібненого вулканізату визначали за реометричними кривими відповідно до [8; 9].

Ефективність процесу оброблення поверхні ПВ оцінювали на підставі аналізу фізико-механічних властивостей вулканізаців, які містили оброблений ПВ. При цьому, як найбільш доцільною концентрацією подрібненого вулканізату вибрано 25 та 50 мас.ч. на 100 мас.ч. каучуку, на що вказується також у [10; 11]. Цей вибір пояснюється також тим, що в залежності від вмісту ПВ, відбувається змінювання механізму руйнування композиції: при незначному вмісті гумової крихти міцність системи в основному визначатиметься міцністю еластомерної матриці, при

цьому відбувається когезійне руйнування матеріалу. При збільшенні дозування більше 25 мас.ч. частинки ПВ здатні до утворення безперервної фази і характер руйнування близький до адгезійного та залежить від міцності зв'язку на міжфазній границі. Для порівняння застосували ПВ, оброблений на валковому обладнанні за відсутністю модифікаторів.

Оброблення поверхні подрібненого вулканізату, яке проведено на лабораторних вальцях, в присутності дослідних модифікаторів не виявило технологічних труднощів. З огляду на зовнішній вигляд та вплив обробленого ПВ на властивості модельних систем оптимальним вмістом добавок можна вважати 4–5 мас.ч. сокомполімерів на 100 мас.ч. подрібненого вулканізату. Для вирішення питання практичного застосування обробленого ПВ його додавали до складу гумових сумішей, які призначені для виготовлення формових гумотехнічних виробів, наприклад, амортизаторів (гуми шифру 7-ІРП-1348).

В табл. 2 наведено результати досліджень еластомерних композицій за допомогою реометру. Встановлено, що додавання обробленого ПВ дозволяють знизити в'язкість гумових сумішей в порівнянні з необробленим ПВ і це дає змогу знизити енергоспоживання при виготовленні та переробці еластомерних композицій. Спостерігається також збільшення максимального моменту крутіння, що свідчить про підвищення ступеня зшивання вулканізаців з обробленим вулканізатом в порівнянні як з необробленим ПВ так і з регенератом.

В табл. 3 наведені властивості еластомерних композицій, які містять 50 мас.ч. подрібненого вулканізату, обробленого сплавом Октофор-МЕЖК та гумою без ПВ. Для порівняння використовували свіжоподрібнений вулканізаціт і вулканізаціт, який зберігався протягом 6 місяців.

Таблиця 1

**Характеристика добавок на основі фенолформальдегідного олігомеру з використанням смоли октофор 10 S**

Шифр	Компоненти	Температура виготовлення, °С	Час виготовлення, хв.	Температура плавлення	Зовнішній вигляд
Октофор-МЕЖК	Октофор 10S + сіль, продукт взаємодії моноетаноламіну з метиловим ефіром жирних кислот (співвідношення 2:1)	90–120	15–22	80–95	Смолоподібна маса темно-коричневого кольору
Октофор-СТС	Октофор 10S + сіль, продукт взаємодії триетаноламіну з стеариноювою кислотою (співвідношення 2:1)	90–120	15–22	70–85	Смолоподібна маса темно-коричневого кольору

Характеристики еластомерних композицій за реометром при 175 °С, які містять подрібнений вулканізатор, оброблений різними типами добавок

Показники	Без ПВ	Регенерат РШТ, мас.ч.		Тип модифікатора для оброблення ПВ та вміст ПВ, мас.ч. на 100 мас.ч. каучуку					
		–		Октофор-МЕЖК		Октофор-СТС			
		20	50	20	50	20	50	20	50
Характеристики за реометром при 170 °С:									
Мінімальний момент крутіння, $M_{min}$ , дН·м	2,60	3,13	3,44	3,25	3,56	3,15	3,48	3,08	3,58
Максимальний момент крутіння, $M_{max}$ , дН·м	18,35	15,93	14,9	14,71	14,00	17,31	15,37	17,46	16,28
Час початку вулканізації $T_2$ , хв	0,72	0,82	0,77	0,86	0,88	0,85	0,87	0,85	0,88
Оптимальний час вулканізації, $T_{95}$ , хв.	3,11	3,01	2,92	3,32	2,76	3,21	2,86	3,21	2,98
Швидкість вулканізації,	41,84	45,66	46,51	40,65	53,19	42,37	50,25	42,37	47,62
Тангенс кута механічних втрат при $M_{min}$ , $tg\delta_{min}$	0,927	0,856	0,779	0,866	0,798	0,832	0,724	0,828	0,740
Тангенс кута механічних втрат при $M_{max}$ , $tg\delta_{max}$	0,160	0,179	0,180	0,165	0,160	0,157	0,154	0,156	0,155

Властивості еластомерних композицій, які містять 50 мас.ч. подрібненого вулканізатора, обробленого сплавом Октофор-МЕЖК та гумою без ПВ

Показники	без ПВ	без ПВ	Октофор-МЕЖК	Октофор-МЕЖК*
	Вміст ПВ			
	–	–	50	50
Характеристики за реометром при 170 °С:				
$M_{min}$ , дН·м	2,6	2,91	3,52	3,75
$M_{max}$ , дН·м	18,35	25,29	13,37	18,06
$T_2$ , хв	0,72	0,46	0,87	0,69
$T_{50}$ , хв	1,33	1,03	1,4	1,28
$T_{95}$ , хв.	2,68	2,74	2,63	2,58
$M_{min}-M_{max}$	15,75	22,38	9,85	14,31
$tg\delta_{min}$	0,927	0,911	0,724	0,717
$tg\delta_{max}$	0,16	0,186	0,154	0,128
$R_v$ , хв. <sup>-1</sup>	10,57	19,38	6,16	9,35
Твердість по Шор А, од				
при 25 °С	73	72	68	71
Умовне напруження при подовженні 200 %, МПа	9,5	7,3	7,2	5,1
Умовна міцність при розтягуванні, МПа:				
при 25 °С	15,7	13,4	11,2	8,4
після старіння 100°С x 72 час.	12,4	12,5	8,9	8,8
Відносне подовження при розриві, %				
при 25 °С	315	340	300	300
після старіння 100°С x 72 час.	220	230	215	190
Опір багаторазовому розтягуванню (200%), тис. циклів	95	92	67	31

\*Оброблений ПВ зберігався протягом 6 місяців

Аналіз механічних втрат при багаторазовому деформуванні показав, що відбувається зниження тангенсу кута механічних втрат при використанні обробленого ПВ в порівнянні з необробленим.

Внаслідок цього при експлуатації виробів в умовах динамічного навантаження суттєво зменшиться теплоутворення, що забезпечить високу експлуатаційну надійність таких гумових виробів, як

амортизатори, вихідної сировиною для яких є гуми шифру 7-ІРП-1348.

На рис. 1 наведено залежність кількості агломератів від їх розміру для гум, які не містять ПВ; для порівняння використовували гуми з необробленим вулканізатом та гуми, які містять оброблений дослідними добавками вулканізат. Як видно, найкращі результати у порівнянні з контрольною гумою має гума, яка містить оброблений дослідними добавками подрібнений вулканізат.

**Висновки і пропозиції.** Таким чином, на основі проведених досліджень надано рекомендації щодо практичного застосування подрібненого вулканізату, обробленого активуючими системами з використанням естерів жирних кислот, сировиною для виробництва яких є курячих жир. Розробка цих модифікуючих добавок вітчизняного виробництва дозволить застосовувати в досить великому обсязі подрібнені продукти відпрацьованих гумових виробів, а це в свою чергу буде сприяти вирішенню екологічної ситуації в країні.

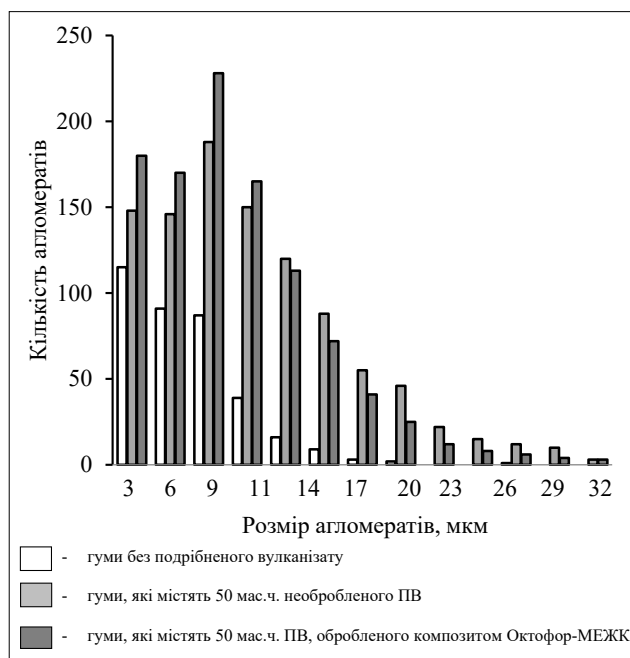


Рис. 1. Розподіл агломератів в гумових сумішах при використанні подрібненого вулканізату

#### Список літератури:

1. Макаров В.М. Использование амортизованных шин и отходов производства резиновых изделий. Л. : Химия, 1986. 248 с.
2. Каучук и резина. Наука и технология / под редакцией Дж. Марка, Б. Эрмана, Ф. Эйрича. М. : Издательство: Интеллект, 2011. 768 с.
3. Пляцук Л.Д., Гурець Л.Л., Будьонний О.П. Утилізація гумових відходів. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2007. вип. 5. Ч. 1. С. 152–154.
4. Нікітченко Ю.С. Економіко-екологічна оцінка технологій переробки автомобільних зношених шин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2012. Вип. 142. С. 58–62.
5. Шаховец С.Е., Богданов В.В. Комплексная регенерация шин. СПб.: Проспект науки, 2008. 198 с.
6. Ващенко, Ю.М. Аспекти ресурсозбереження при виробництві та експлуатації еластомерних матеріалів. *Вопросы химии и химической технологии*. 2013. № 3. С. 56–63.
7. Вострокнутов Е.Г., Новиков М.И., Прозоровская Н.В. Переработка каучуков и резиновых смесей (реологические основы, технология, оборудование). М. : Химия. 2005. 369 с.
8. Євдокименко Н.М., Піскорський А.Ю., Гаврилюк Ю.В., Бур'ян І.В. Розробка методики оцінки параметрів геометричної фазової морфології гуми. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2009. № 4/10 (40). С. 11–14.
9. Гоголев М.А., Захаров Н.Д., Гоголев М.А., Захаркин О.А., Емельянов Д.П. Некоторые особенности процесса изготовления протекторных резиновых смесей, содержащих измельченный вулканизат. *Каучук и резина*. 1982. № 9. С. 25–27.
10. Кобельчук Ю.М., Ващенко Ю.М., Голуб Л.С. Застосування 4,4'-дигідроксидифенілсульфону та його поліметилольної похідної як добавок у складі еластомерних матеріалів. *Питання хімії та хімічної технології*. № 4, Дніпро : ДВНЗ УДХТУ. 2021. С. 66–72.
11. Holub L.S., Vashchenko Yu.N., Andriianova M.V. Application of modifying systems based on phenol-formaldehyde resins and products of processing of fat-containing raw materials in elastomeric compositions. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. № 2, Ukrainian State University of Chemical Technology. 2022. P. 9–16.

#### Holub L.S., Vashchenko Yu.N. CURRENT ISSUES OF USE OF CRUSHED PRODUCTS OF PROCESSING OF SECONDARY RAW MATERIALS

*The growth of world production and consumption of polymeric and elastomeric materials causes a constant increase and accumulation of waste generated both in the production process and in the process of their processing. Construction materials based on elastomers are widely used in engineering, with up to 80% of*

*the specific weight of rubber waste are used car tires. The accumulation of a large volume of these waste products creates a significant problem in both environmental and industrial aspects. Non-renewable natural crude oil leads to the need to solve the problem of using secondary resources with their maximum efficiency. The problem of using worn-out tires is also of significant economic importance, as the needs of the economy in natural resources are constantly growing, and their value is constantly increasing. Processing of used rubber products, with the subsequent use of processed products in the formulations of finished elastomeric products will significantly reduce the cost of manufactured products. In addition, reducing the amount of accumulated used rubber products will significantly improve the environmental situation in the country. The aim of the work was to find new components for modifying systems of domestic production, which are used for surface treatment of crushed vulcanizate. This is also a topical issue for expanding the range of additives based on sulfur-containing phenol-formaldehyde resin octophore 10S for the modification of crushed products of recycled waste rubber products. The objects of the study were the products of mechanical grinding of worn rubber products, in particular tires, as well as products of grinding of rubber products. Based on the results of previous studies, alloys based on phenol-formaldehyde oligomer – octophor 10S resin were used to treat the surface of crushed vulcanizate together with salts obtained by combining ethanolamines and stearic acid, as well as fatty acid methyl ester, the raw material was chicken. As an amine-containing component, a salt obtained by the interaction of triethanolamine with stearic acid was studied. On the basis of the conducted researches recommendations on practical application of the crushed vulcanizate processed by activating systems with use of esters of fatty acids which raw materials for production are chicken fat are given. The development of these modifying additives of domestic production will allow the use of a fairly large amount of crushed products of used rubber products, which in turn will help solve the environmental situation in the country.*

**Key words:** resource saving, elastomeric compositions, physical and mechanical parameters, modifying additives.

UDC 678.746:744  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/31>

**Grytsenko O.M.**

Lviv Polytechnic National University

**Baran N. M.**

Lviv Polytechnic National University

**Dulebová L.**

Technical University of Košice

**Berezhnyy B.-V.V.**

Lviv Polytechnic National University

## THE EFFECT OF THE FILLER NATURE ON THE PROPERTIES OF HYDROGELS BASED ON POLYVINYLPIRROLIDONE COPOLYMERS

*The influence of nature and amount of filler on technological and performance properties of polymer hydrogels based on copolymers of 2-hydroxyethylmethacrylate (HEMA) with polyvinylpyrrolidone (PVP) have been investigated. The synthesis of composite copolymers was carried out by the method of polymerization with simultaneous filling, which consists in the mechanical mixing of the original composition with the filler and its subsequent curing under the action of initiators or catalysts. To obtain filled hydrogels, a copolymerization of HEMA with PVP in the presence of iron sulfate (II) was used, which occurs at high rate, at room temperature, in air, which greatly simplifies and reduces the cost of the process, reduces its duration and expands the areas of application. For research, fillers of organic nature – wood flour, grinded waste of hydrogel material and mineral – aerosil, crushed glass, amorphous silica SiO<sub>2</sub> were used. Test samples based on filled hydrogels were obtained in polymerization mold by pouring method. In order to combine the stages of synthesis of the hydrophilic polymer and its subsequent swelling to provide elastic properties, the polymerization was carried out in the presence of water. To improve the mechanical properties and reduce the shrinkage of the hydrogel materials, small amounts of triethylene glycol dimethacrylate were introduced into the formulation of the initial polymer-monomer composition, which promotes the increase of crosslinking degree and hardness of the copolymer.*

*The influence of nature and the amount of filler on the performance properties of the material, namely – shrinkage, hardness, resilience, plasticity have been studied.*

*It was established that the presence of filler has a positive impact on the physico-mechanical properties of copolymers – there is a regular increase in the hardness of the compositions with the addition of filler, although the resilience thereby decreases slightly. In particular, the addition of fillers has a sharp effect on the shrinkage, which decreases in each case, regardless of its nature.*

**Key words:** polyvinylpyrrolidone, 2-hydroxyethylmethacrylate, copolymers, composite hydrogels, filled hydrogels, fillers.

**Formulation of the problem.** Quick-setting materials with high resilience-deformation properties and high accuracy of reproduction of the duplicated surface, as well as low-tonnage technologies of obtaining products, which can be carried out directly in an outpatient or clinical setting, are currently needed as duplicate materials for clasp prosthetics in dentistry.

The main properties that assess the suitability of polymer material for the manufacture of duplicate molds are shrinkage and quality of reproduction of the purity and sizes of the surfaces of duplicate objects, also they must be characterized by corresponding resilience and hardness [1, p. 327]. The first

characteristics determine the accuracy and purity of reproduction of the dimensions, and the hardness with resilience – the reliability and durability of the mold during operation.

For these purposes in orthopedic dentistry are used materials and technologies for duplicate molds, which are characterized by durability and multi-stage [1, p. 327]. However, such materials do not always meet modern requirements for the accuracy of the size and quality of reproduction of the duplicated surface. Existing molding methods are mainly technologically complex and are characterized by limited ability to control the structure and properties of the polymer.

In this regard, the problem of searching for new polymers and simple technologies for molding precise products is extremely relevant.

The possibility of obtaining quick-setting polymer-oligomer compositions based on 2-hydroxyethylmethacrylate (HEMA) and polyvinylpyrrolidone (PVP) has been proved. They possess high reactivity and can be cured in air at room temperature for 2–30 min depending on the original composition formulation [2, p. 59; 3, p. 236; 4, p. 82] and can be used to obtain duplicate molds. However, the obtained materials require an improvement in the strength and resilience properties, as well as reduction of the shrinkage impact on dimensional accuracy. One of the methods of modifying polymer hydrogels and improving their physico-mechanical properties is the use of fillers. The addition of fillers opens up new ways to influence the formation of the structure and significantly expands the range of properties and, consequently, the use of polymer materials, which is why the study of filled hydrogels is of both scientific and practical importance.

**Analysis of recent research and publications.** Polymer hydrogels find a wide practical use in the biomedical field [5, p. 18; 6, p. 197] as hydrogel medical dressings [7, c. 1569], contact lenses [8, c. 52], hydrogel membranes [9, c.889], materials for regeneration of damaged tissues [10, c. 14976], as enzyme immobilization systems [11, c. 1666], drug delivery systems [12, c. 1993], vascular prostheses [13, c. 1537]. They swell but do not dissolve in water and saline. Due to their structure, which resembles the structure of living tissues, hydrogels are characterized by good biocompatibility, which allows them to be used in a direct contact with a living organism.

Among the wide range of hydrogel polymers known today, HEMA with PVP copolymers have a number of valuable performance properties [5, p. 18; 6, p. 197]. Preliminary studies conducted in the Department of Chemical Technology of Plastics Processing at Lviv Polytechnic National University developed compositions based on PVP, mono- and dimethacrylic esters of glycols, which polymerize under the action of metal ions with variable oxidation state [2, p. 59; 3, p. 236; 4, p. 118]. PVP affects the course of polymerization of HEMA (polymerization of HEMA in the presence of PVP occurs by a matrix mechanism), the formation of the structure and the properties of the final product. “Matrix effect” [14, p. 136], when monomer molecules are solvated on a polymer matrix, promotes the increase of polymerization rate, the course of the reaction with the transfer of the kinetic chain on the PVP macromolecule

and the formation of grafted cross-linked copolymer (pHEMA-gr-PVP). The kinetics of polymerization has been studied, the optimal composite formulations were selected, the ways of practical application of such copolymers in the biomedical field are found [9, p. 52; 15, p. 6; 16, p. 187]. The obtained hydrogels based on pHEMA-gr-PVP copolymers attract attention with their elasticity, resilience, high chemical and biological inertness, which provides the prospect of their use as technological materials for dental practice, in particular, as duplicating masses in prosthetics [17, p. 39].

**Formulation of the article goals.** The aim of the work was to investigate the influence of nature and amount of filler on the main technological and operational properties of hydrogel copolymers based on HEMA with PVP compositions and to identify possible ways to improve these properties and to reduce the cost of the original composition.

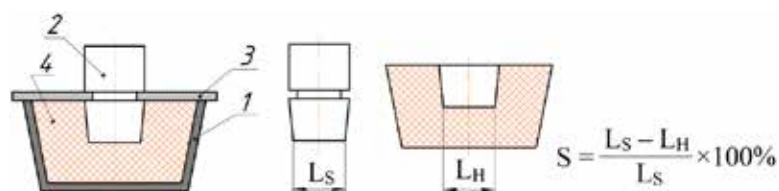
#### **Presentation of the main material**

**Materials and methods of research.** The following substances were used: 2-hydroxyethylmethacrylate (Sigma Chemical Co), which was purified and distilled under vacuum (residual pressure = 130 N/m<sup>2</sup>, T<sub>B</sub>=351K); polyvinylpyrrolidone (AppliChem GmbH) of high purity with MM = 28000 was dried at 338 K in vacuum for 2-3 hours before use; iron (II) sulfate was used of p.a. grades.

For research, fillers of organic nature were used – wood flour (particle size 0,15–2,5 mm), grinded waste of hydrogel material (particle size 0,25–0,8 mm) and mineral – aerosil, crushed glass (fraction 0,05–0,16), amorphous silica SiO<sub>2</sub> (CP). Shrinkage of the material (S, %) was determined by the difference between the size of the template and the hydrogel imprint using a cathetometer KM-8 with a measurement accuracy of ± 0,005 mm, strain-resilience properties – on the hardness meter TShR according to the procedure described in [18, p. 429].

#### **Results and discussion**

Polymer-monomer compositions (PMC) based on HEMA with PVP, especially in the presence of solvent (e.g., water, dimethyl sulfoxide) are characterized by high fluidity, which ensures their ability to process into products by pouring method to obtain quality products of various shapes. The prototypes were obtained in polymerization mold, the main elements of which are the matrix and the sign (Fig. 1). The outer molding surface (matrix) was made from polypropylene, because the adhesion of pHEMA-gr-PVP copolymers to it is the lowest, the sign (duplicate object) – from polytetrafluoroethylene.



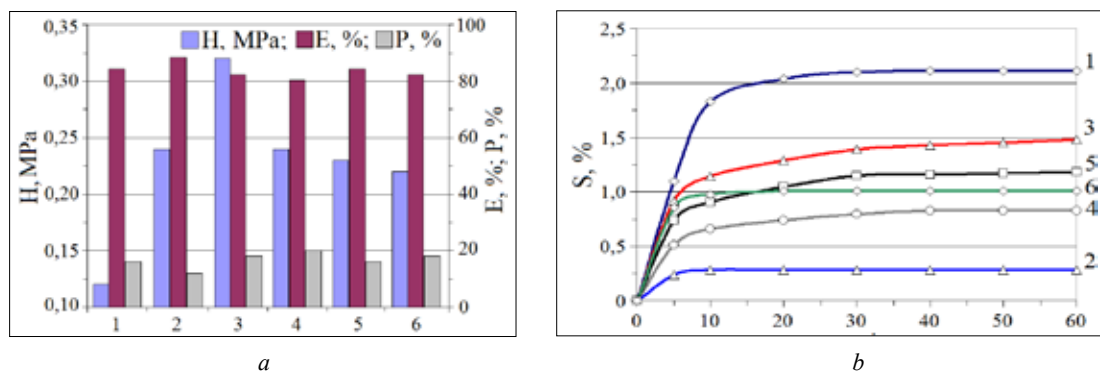
**Fig.1. Mold for the manufacture of prototypes from pHEMA-gr-PVP copolymers by pouring method:**  
1 – matrix; 2 – sign; 3 – cover-holder of the sign; 4 – hydrogel

Synthesis of composite pHEMA-gr-PVP copolymers was carried out by the method of polymerization with simultaneous filling, which consists in mechanical mixing of the original composition with the filler and its subsequent curing under the action of initiators or catalysts. On the basis of the results of previous studies [2, p. 59; 3, p. 236; 4, p. 118], copolymerization of HEMA with PVP in the presence of iron sulfate (II) was used to obtain imprinted masses. Polymerization occurs at high rate, at room temperature, in air, which greatly simplifies and reduces the cost of the process, reduces its duration and expands the areas of application. Based on previous studies, a following polymer-monomer composition was chosen with the formulation HEMA:PVP=80:20 mass parts with 100 mass parts of solvent (H<sub>2</sub>O). The choice of such formulation of the original composition arise due to the fact that the lower PVP content significantly increases the curing time of the compositions, the higher PVP content increases the duration of its dissolution in HEMA, hence the viscosity of the composition increases, which becomes difficult to dose and deaerate. In order to combine the stages of synthesis of the hydrophilic polymer and its subsequent swelling to provide elastic properties, the polymerization was performed in water. At the same time, solution polymerization

helps to avoid or minimize the exothermic effect that accompanies block polymerization of methacrylates [14, p. 136; 19, p. 1109]. To improve the mechanical properties and reproducibility of duplicate objects, triethylene glycol dimethacrylate (TEGDMA) was added to the original PMC, which promotes the increase of crosslinking degree and hardness of the copolymer [17, p. 39].

The influence of nature and the filler amount on the performance properties of the material were studied, namely shrinkage, as well as hardness, resilience, plasticity, which were characterized by the hardness number (H, MPa), elasticity index (E, %) and plasticity index (P, %) respectively.

The study results of the obtained composite hydrogels on the basis of compositions with the maximum possible filler content at which the composition retained the necessary technological properties (fluidity and viability) are shown in Fig. 2. For aerosil this amount is 10 wt.% by weight of the composition, for wood flour – 15 wt.%, for SiO<sub>2</sub> – 23 wt.%, for grinded hydrogel – 40 wt.%, for crushed glass – 100 wt.%. Figure 3 presents the study results of the influence of the filler nature with its same content on the properties and changes in the deviation of the size (S) of duplicate molds over time. According to the analysis of the obtained results, the addition of



**Fig. 2. Dependence of properties (a) and changes in size deviation (S) of duplicate molds over time (b) from the maximum content of filler (PMC:H<sub>2</sub>O=1:1 mass parts; T=298 K. PMC formulation, mass parts: HEMA:PVP:TEGDMA=70:29:1):**  
1 – unfilled hydrogel; 2 – crushed glass (100 wt.%); 3 – wood flour (15 wt.%); 4 – amorphous silica (23 wt.%); 5 – grinded material (40 wt.%); 6 – aerosil (10 wt.%)

filler mostly has a positive impact on the physico-mechanical properties of copolymers. In particular, the filler has a sharp effect on the shrinkage, which decreases in each case, regardless of its nature.

In the case of aerosil use (10 %) shrinkage equals 0,28 % and remains unaltered within 24 hours, which is four times less than the shrinkage of the hydrogel material without filler in 5 minutes and 7,5 times in an hour. Besides, a significant reduction in shrinkage is characteristic to the composition with SiO<sub>2</sub> and wood flour. Compositions containing as a filler – grinded waste of hydrogel material and aerosil have dimensional stability of the elastogel imprint over time and even after 24 hours.

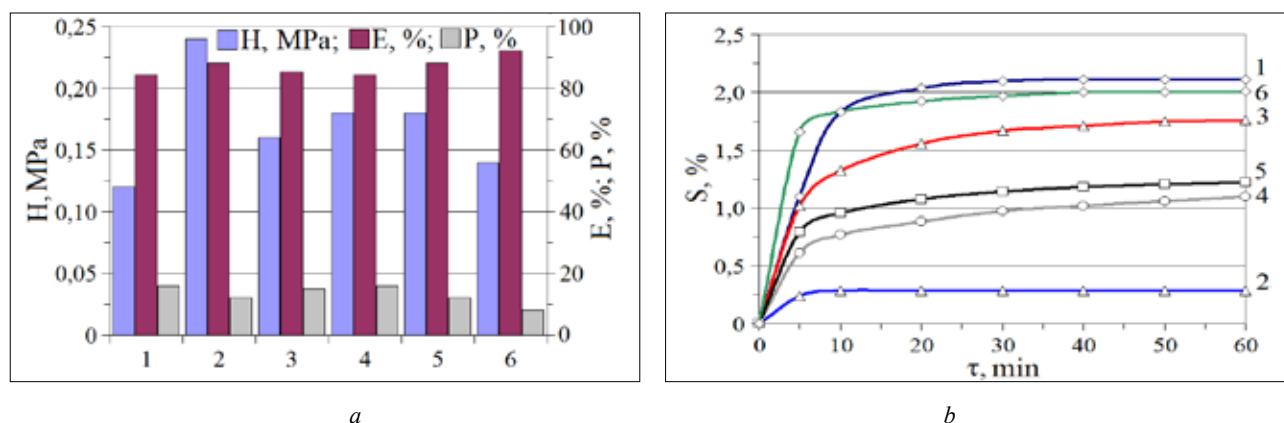
Since shrinkage occurs due to the formation of a crosslinked polymer because of the reduction of the distance between the macrochains, it is obvious that the filler particles promote to maintain distances

between macromolecules, and crosslinking occurs between particles with the inclusion of the latter into crosslinked structure.

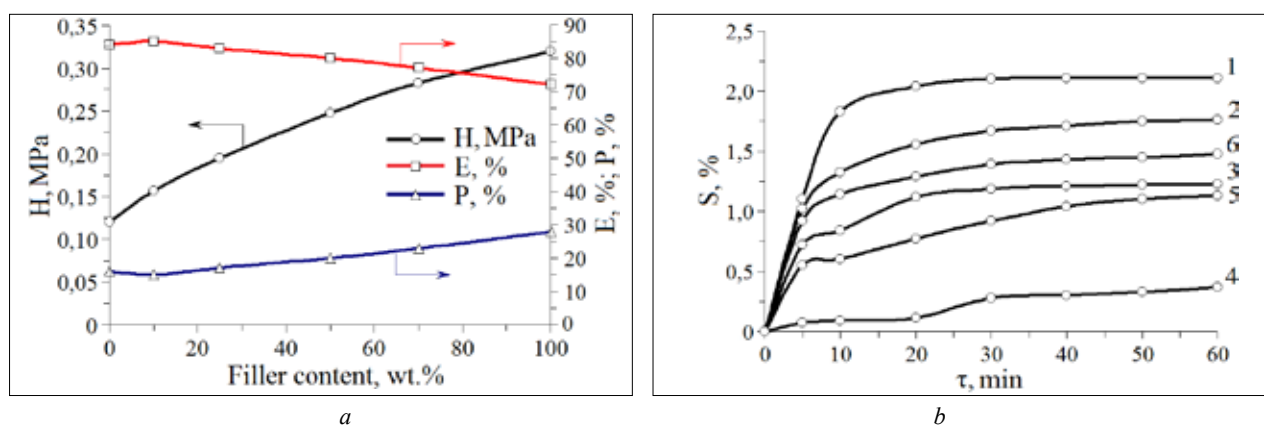
To detect the effect of the filler amount on the properties of the filled hydrogel, the samples were made with different content of crushed glass (Fig. 4). The extreme dependence of the hydrogel imprint size change on the filler content was established. The best results were obtained for the content of crused glass in the amount of 50 % by weight of the composition.

Regarding the physico-mechanical properties, there is a natural increase in the hardness of the compositions with the addition of a filler, although the resilience is slightly reduced.

**Conclusions.** As a result, conducted studies of the performance properties of filled hydrogel materials showed a positive effect of filling on the shrinkage



**Fig. 3.** The effect of filler nature on the properties (a) and the changes in the deviation of the size (S) of duplicate forms in time (b) (PMC:H<sub>2</sub>O=1:1 mass parts; T=298 K. PMC formulation, mass parts: HEMA:PVP:TEGDMA=70:29:1; filler content – 10 wt.%):  
1 – unfilled hydrogel; 2 – crushed glass; 3 – wood flour; 4 – amorphous silica; 5 – grinded material; 6 – aerosil.



**Fig. 4.** Effect of filler content (crushed glass) on properties (a) and change of size deviation (S) of duplicating molds in time (b) (PMC:H<sub>2</sub>O=1:1; T=298 K; PMC formulation, mass parts: HEMA:PVP:TEGDMA=70:29:1):  
Filler content, wt.%:  
1 – 0; 2 – 10; 3 – 25; 4 – 50; 5 – 70; 6 – 100.



and hardness of hydrogels and the possibility of using fillers not only for economic purposes – to reduce the cost of polymeric materials, but to improve physico-mechanical properties.

The following research will be aimed at studying the influence of the filling process on the kinetics of polymer-monomer compositions curing, as well as on the structure of the obtained composite hydrogels.

#### References:

1. Рожко М. М., Неспрядько В. П. Ортопедична стоматологія. Київ : Книга плюс, 2003. 552 с.
2. Гриценко О. М., Гначчук Н. М., О. В. Суберляк О. В. Вплив ініціувальної системи на структуру та властивості гідрогелів на основі кополімерів полівінілпіролідону. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. № 5/8(65). С. 59–63.
3. Суберляк О. В., Скорохода В. Й., Гриценко О. М. Наукові аспекти розроблення технології синтезу гідрофільних кополімерів полівінілпіролідону, *Вопросы химии и хим. технологии*. 2000. № 1. С. 236–238.
4. Похмурська А. В., Гриценко О. М., Баран Н. М., Волошкевич П. П. Особливості синтезу та структура Ag(0)/пГЕМА-пр-ПВП нанокмполімерів, одержаних полімеризацією з осадженням металу. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. № 30(69). 2. С. 118–124.
5. Hoffman, A. S. Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012. Vol. 64. P. 18–23.
6. Pal K., Banthia A. K., Majumdar D. K. Polymeric hydrogels: characterization and biomedical applications (review). *Designed Monomers and Polymers*. 2009. Vol. 12. P. 197–201.
7. Baron R. I., Culica M. E., Biliuta G., Bercea M., Gherman S., Zavastin D., Ochiuz L., Avadanei M., Coseri S. Physical Hydrogels of Oxidized Polysaccharides and Poly(Vinyl Alcohol) for Wound Dressing Applications. *Materials*. 2019. Vol. 12(9). P. 15–69.
8. Suberlyak O., Skorokhoda V., Kozlova N., Melnyk Yu., Semenyuk N., Chopyk N. The polyvinylpyrrolidone graft copolymers and soft contact lenses on their basis. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2014. Vol. 5/3(5). P. 52–57.
9. Suberlyak O. V., Mel'nyk Y. Y., Skorokhoda V.I. Regularities of Preparation and Properties of Hydrogel Membranes. *Materials Science*. 2015. 50. P. 889–896.
10. Zhao H., Liu M., Zhang Y., Yin J., Pei R. Nanocomposite hydrogels for tissue engineering applications. *Nanoscale*. 2020. Vol. 12. P. 14976–14995.
11. Ciardelli G., Cristallini C., Barbani N., Benedetti G., Crociani A., Travison L., Giusti P. Bioartificial polymeric materials: -amylase, poly(2-hydroxyethyl methacrylate), poly(N-vinylpyrrolidone) system. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2002. Vol. 203. P. 1666–1673.
12. Hoare T. R., Kohane D. S. Hydrogels in drug delivery: Progress and challenges. *Polymer*. 2008. Vol. 49. P. 1993–2007.
13. Xing M., Yu C., Wu Y., Wang L., Guan G. Preparation and characterization of a polyvinyl alcohol/polyacrylamide hydrogel vascular graft reinforced with a braided fiber stent. *Textile Research Journal*. 2020. Vol. 90(13–14). P.1537–1548.
14. Suberlyak O., Skorokhoda V. Hydrogels based on polyvinylpyrrolidone copolymers. *Hydrogels*. Haider, S., Haider, A., Eds.; IntechOpen: London, United Kingdom. 2018. P. 136–214.
15. Grytsenko O., Pokhmurska A., Suberlyak S., Kushnirchuk M., Panas M., Moravskiy V., Kovalchuk R. Technological features in obtaining highly effective hydrogel dressings for medical purposes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6(6 (96), P. 6–13.
16. Skorokhoda V., Semenyuk N., Dzjaman I., Suberlyak O. Mineral filled porous composites based on PVP copolymers with bactericidal properties. *Chemistry & Chemical Technology*. 2016. Vol. 10(2). P. 187–192.
17. Суберляк О. В., Скорохода В. Й., Гриценко О. М. Еластогелеві матеріали з високою дублювальною здатністю. *Хімічна промисловість України*. 2008. № 4. С. 39–44.
18. Suberlyak O., Grytsenko O., Kochubei V. The role of FeSO<sub>4</sub> in the obtaining of polyvinylpyrrolidone copolymers. *Chemistry & Chemical Technology*. 2015. Vol. 9(4). P. 429–434.
19. Суберляк О. В., Порецкая М. Ш., Яремко Г. М. Особенности безинициаторной полимеризации 2-оксиэтилен(мет)акрилата в присутствии поливинилпирролидона. *Украинский химический журнал*. 1988. Т. 54(10). С. 1109–1111.

**Гриценко О.М., Баран Н.М., Дулебова Л., Бережний Б.-В.В.**  
**ВПЛИВ ПРИРОДИ НАПОВНЮВАЧА НА ВЛАСТИВОСТІ ГІДРОГЕЛІВ**  
**НА ОСНОВІ КОПОЛІМЕРІВ ПОЛІВІНІЛПІРОЛІДОНУ**

*В роботі досліджено вплив природи та кількості наповнювача на технологічні та експлуатаційні властивості полімерних гідрогелів на основі кополімерів 2-гідроксіетилметакрилату (ГЕМА)*

з полівінілпіролідом (ПВП). Синтез композиційних кополімерів здійснювали методом полімеризації з одночасним наповненням, який полягає у механічному змішуванні вихідної композиції з наповнювачем та подальшого її затвердження під дією ініціаторів чи каталізаторів. Для одержання наповнених гідрогелів використали кополімеризацію ГЕМА з ПВП в присутності феруму сульфату (II), яка відбувається з високою швидкістю за кімнатної температури, на повітрі, що дає можливість значно спростити та здешевити процес, скоротити його тривалість і розширити можливості його використання. Для досліджень використовували наповнювачі органічної природи – деревна мука, перемелені відходи гідрогельного матеріалу та мінеральні – аеросил, мелене скло, аморфний кремнезем  $\text{SiO}_2$ . Дослідні зразки на основі наповнених гідрогелів одержували у полімеризаційній формі методом заливання. З метою суміщення стадій синтезу гідрофільного полімеру і подальшого його набрякання для надання еластичних властивостей, полімеризацію здійснювали у присутності води. Для покращення механічних властивостей та зменшення усадки гідрогелевих матеріалів до складу вихідної полімер-мономерної композиції вводили невеликі кількості диметакрилату триетиленгліколю, який сприяє зростанню ступеня зшивання і підвищенню твердості кополімеру.

Вивчали вплив природи та кількості наповнювача на експлуатаційні властивості матеріалу, а саме – усадку, твердість, пружність, пластичність.

Встановлено, що присутність наповнювача позитивно впливає на фізико-механічні властивості кополімерів – простежується закономірне зростання твердості композицій, хоча пружність при цьому децю зменшується. Зокрема, додавання наповнювачів різко впливає на усадку, яка зменшується в кожному випадку незалежно від його природи.

**Ключові слова:** полівінілпіролідон, 2-гідроксіетилметакрилат, кополімери, композиційні гідрогелі, наповнені гідрогелі, наповнювачі.

УДК 535.372.547

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/32>**Дістанов В.Б.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Миرونенко Л.С.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Кадочкіна В.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Школьнікова Т.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ 4-МОРФОЛІНОНАФТАЛІМІДІВ

Дана робота присвячена удосконаленню технології отримання 4-мор-фолінонафталімідів, які знайшли широке застосування в різних галузях науки і техніки. Як відомо, для отримання таких похідних з метою синтезу органічних люмінофорів з специфічними властивостями зазвичай використовується двоетапний метод, який заснований на отриманні спочатку 4-галоген-нафталіміду, його виділенні з реакційної маси і подальшій взаємодії з морфоліном, або навпаки. Спочатку отримується 4-морфолінонафталевий ангідрид і далі перетворюється в відповідний нафталімід реакцією з первинними ароматичними або аліфатичними амінами. Вихід кінцевого продукту за обома цими напрямками складає 50-60 %. Також такі способи призводять до появи значної кількості рідких відходів виробництва, що може нанести суттєву шкоду навколишньому середовищу. В процесі роботи нами розроблений новий підхід до одноетапного синтезу похідних 4-заміщених нафталенової кислоти. Розроблено дві таких методики, які дають можливість отримання кінцевих продуктів без виділення прекурсорів, отриманих на попередній стадії. Завдяки цьому вихід кінцевих продуктів збільшується до 85-92 %. Враховуючи, що синтезовані нафталіміди перспективні для багатьох застосувань, ми розробили принципові блок-схеми їх одержання за одно- та двоетапними технологіями. На підставі розроблених блок-схем виробництва нафталімідів запропоновані можливі технологічні схеми їх синтезу в умовах впровадження в виробництво. Технологічна схема одноетапного синтезу при реалізації її в виробництві не передбачає будь-яких ускладнень і дозволяє використовувати стандартну апаратуру, яка виробляється в Україні. Запропонована технологія передбачає скорочення шкідливих відходів приблизно в два рази та зменшення кількості технологічного обладнання при організації виробництва, що є вигідним з екологічної та економічної точки зору.

**Ключові слова:** 4-Бромнафталевий ангідрид, 4-морфолінонафталімід, первинні та вторинні аміни, одноетапний синтез, блок-схема, технологічна схема.

**Постановка проблеми.** Органічні люмінофори на основі 4-заміщених 1,8-нафталіндикарбонової кислоти знайшли широке використання в багатьох галузях науки і техніки [1]. Суттєва увага приділяється 4-аміно-заміщеним. В той же час, 4-аміно- та 4-алкіламінопохідні для деяких застосувань, які пов'язані з світлостійкістю, не задовольняють вимогам. Найбільш перспективними є 4-діалкіламінонафталіміди.

4-Діалкіламінонафталіміди – люмінофори жовто-зеленого світіння – застосовуються в якості люмінесцентних складових денних флуоресцентних пігментів різного призначення [2-4], для

забарвлення природних, штучних і синтетичних волокон і тканин [5-9], полімерних матеріалів [10; 11], в аналітичній хімії [12; 13], біології та медицині в якості флуоресцентних зондів [14-16], як активне середовище лазерів на барвниках [17], в нематичних рідинних кристалах [18; 19], в люмінесцентній дефектоскопії металевих і неметалевих виробів [20-21], тощо.

Одним із цікавих застосувань органічних люмінофорів і матеріалів з їх використанням є розробка барв для малювання на воді [22].

Малювання на воді – технологія, яка дозволяє створювати фантастичні за своєю яскравістю

фарби, які ефективно перетікають одна в одну. Малювання на воді за технологією Ебру означає, що поверхнею для нанесення візерунку служить рідина. Правда, це не звичайна вода і фарба повинна бути спеціальною.

Ебру – це один з видів старовинного тюрко-ісламського мистецтва, перші спогади про нього датуються 12 століттям. Суть даного виду мистецтва полягає у взаємодії двох рідин різної консистенції. У ємність наливається вода з розчинним екстрактом гевеї – завдяки цьому вода стає густою. Також малювання передбачає використання спеціальних фарб, що містять бичачу жовч і мінеральні барвники – такі фарби досить рідкі, щоб художньо і красиво розтікатися по поверхні.

Протягом століть при виготовленні оригінальних фарб Ебру використовуються лише натуральні барвники, які отримують з кольорових гірських порід і землі, що вміщують нерозчинні окислені або органічні пігменти. Використати масляні барви і анілінові барвники в традиційному виготовленні Ебру не має можливості, тому що вони розчиняються у воді, і папір до них не сприйнятливий.

Створений для закріплення рисунок накрияють листом білого паперу, акуратно знімають з поверхні води і сушать. Такий спосіб сьогодні використовують для мармурування не тільки паперу, а й шкіри, скла, деревини, текстилю, пластмаси та інших матеріалів. Тільки основою фарб зараз є не бичача жовч, а різноманітні матеріали на зразок крохмалю або клейстеру.

Ебру не має на меті отримання в кінцевому результаті якого-небудь точного зображення. В процесі з'являється химерне сплетіння ліній, що народжує дивовижний орнамент. Малювання на воді схоже на танець, в якому кружляють рідина і фарба, – гармонійно підібрані відтінки здатні сплести чарівний візерунок.

Існує декілька прийомів для нанесення рисунка на матеріал (папір, тканину, шкіру тощо).

Одним з таких є, наприклад, техніка «Ебру шаль». Малюнки, які виходять в цій техніці, нагадують орнаменти на традиційних анатолійських хустках і шалях. Звідси і назва. Фарбу розбризкують на поверхню води, далі за допомогою шила формують малюнок «припливи і відливи» – проводять їм по поверхні вліво-вправо або вгору-вниз, потім з цього ж малюнку роблять кругові рухи шилом. В результаті таких комбінованих рухів і виходить малюнок «Ебру шаль», один з яких відображений на рисунку 1.



Рис. 1. Малюнок у техніці «Ебру шаль» [23]

В оригінальному рецепті фарб Ебру використовуються лише натуральні компоненти, які важко знайти у наших широтах, тому особливої ваги набувають альтернативні рецептури з синтетичних компонентів.

Одним з таких компонентів являються пігменти на акрилатній основі. Основою для створення кольорової гами барвників для цього використання є органічні люмінофори жовто-зеленого світіння [24].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Якщо отримання поліконденсаційних полімерів засновано на таких засадах, при яких барвник проявляє свої максимальні властивості завдяки входженню в структуру макромолекули, то при отриманні полімерізаційних пігментів важливу роль відіграє розчинність органічного люмінофору в мономері.

Незважаючи на те, що багато органічних люмінофорів мають гарні колориметричні характеристики, присутні і недоліки, які обмежують можливість їх використання при розробці пігментів на акрилатній основі.

Одним з них є незначна розчинність деяких похідних в мономерах, у нашому випадку в метилметакрилаті. Найбільш ефективними за своїми люмінесцентними фізико-хімічними властивостями та їх розчинністю в мономері виявились похідні нафталевої кислоти.

В зв'язку з цим необхідно було дослідити відповідні аналоги 4-морфо-лінонафталімідів, структурні формули яких наведені на рисунках 2–4.

Сполуки 2 і 3 виявились не зовсім придатними для їх використання в якості люмінесцентних складових акрилатних пігментів в результаті їх недостатньої розчинності в метилметакрилаті (розчинність в мономері складає близько 2 % від

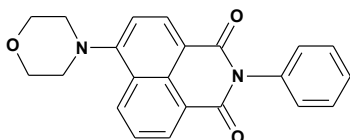


Рис. 2. 4-Морфоліно-N-фенілнафталімід

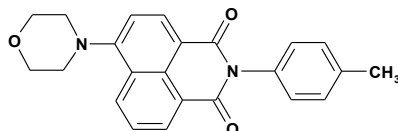


Рис. 3. 4-Морфоліно-N-(п-метил)-феніл-нафталімід

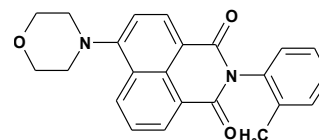


Рис. 4. 4-Морфоліно-N-(о-метил)-феніл-нафталімід

загальної маси). При такій концентрації колір не буде насиченим. В той же час 4-морфоіно-N-(*о*-метил)-фенілнафталімід розчиняється в метил-метакрилаті в кількості 6 % від маси мономеру при температурі полімеризації 80 °С завдяки тому, що молекула стає менш планарною.

Для підтвердження можливості застосування акрилатних пігментів при виготовлення фарб для малювання на воді були визначені розміри частинок отриманого нами жовтого акрилатного пігменту з використанням 4-морфоліонафталіміду (див. рис. 5).

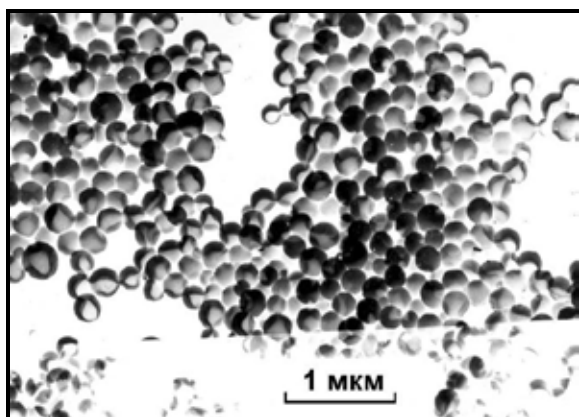


Рис. 5. Мікрофотографія жовтого пігменту на акрилатній основі

Для цього частинки пігменту диспергували в дистильованій воді, яка містить 0.001 % детергенту «неолону». Тонкий шар дисперсії наносять на свіжий сколок монокристалу NaCl. Після цього напилують вуглецеву репліку в вакуумі 10<sup>-4</sup> торр. Репліку відділяють в дистильованій воді і сушать на повітрі. Вивчення і фотографування проводили на електронному мікроскопі EM-125 при прискорувальній напрузі 75 кВ.

Як видно з рисунку, розміри частинок отриманих пігментів знаходяться в межах 0,1–0,2 мкм. А це дає можливість їх використання при розробці барв для малювання на воді.

Використання цих люмінофорів при розробці ДФП дозволило створити пігменти і емалі на їх основі з тоном кольору близьким до ДФП

на основі феніліміду 4-амінонафталенової кислоти (див. табл. 1).

Таблиця 1  
Колориметричні характеристики ДФЕ з використанням ДФП на основі синтезованих органічних люмінофорів

Люмінофор	В, %	Р, %	λ, нм
	113	82	564
	121	95	571
	124	97	570
	128	97	567

Як видно з таблиці 1, при використанні 4-морфоіно-N-(*о*-метил)-фенілнафталіміду, жовтий пігмент на 10-20 % перебільшує за показником відносної яскравості закордонні аналоги.

**Формулювання цілей статті.** Використання дефіцитних первинних амінів при отриманні нафталімідів не дає можливості широкого застосування таких похідних. Для вирішення цієї проблеми треба використовувати більш доступні промислові первинні аміни, наприклад, моноетаноламін, амінопропіловий спирт тощо.

В зв'язку з цим постало питання розробки технології отримання похідних 4-морфоліонафталімідів.

Зазвичай у всьому світі 4-діалкіламінонафталіміди отримують в дві стадії [25]. Це необхідно для можливості введення функціональних угруповань як в імідну частину молекули, так і в нафталінове

ядро для придання люмінофору специфічних властивостей з метою його цілеспрямованого використання.

Такий підхід до їх отримання призводить до зниження виходу кінцевого продукту, отриманню значної кількості промислових стоків, збільшенню тривалості процесу. А це з економічної та екологічної точки зору не зовсім прийнятно.

За попередніми даними є значна зацікавленість в розробці матеріалів з їх використанням.

Метою даної роботи є розробка нового підходу до створення технології одностадійного синтезу 4-морфолінонафталімідів та технологічної схеми їх виробництва.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** 4-Заміщенні нафталенового ангідриду самі по собі являються ефективними люмінофорами. Однак чутливість до лужних реагентів обмежує галузі їх застосування. В зв'язку з цим, найбільш перспективними (за фізико-хімічними властивостями і спектральними характеристиками) є нафталіміді.

Введення в молекулу нафталенового ангідриду діалкіламіногруп дозволяє суттєво збільшити стійкість до дії УФ випромінювання. В більшій мірі це проявляється при введенні гетероциклічних замісників (морфоліновий, піперидиновий або піперазиновий цикли). Такі похідні володіють інтенсивною люмінесценцією в жовто-зеленій зоні спектру, високою розчинністю в різних орга-

нічних середовищах. Доступність вихідної сировини і простота отримання дають широку можливість для організації промислового випуску таких люмінофорів.

Зазвичай алкіл(арил)іміді 4-діалкіламінонафталенової кислоти отримують в дві стадії. Це обумовлено тим, що молекула нафталенового ангідриду має два реакційних центра – ангідридні угруповання і замісник в нафталіновому кільці. Умови протікання реакції по обом центрам різні. В зв'язку з тим, що в молекулу необхідно вводити замісники різноманітної структури для визначення можливості запровадження отриманих сполук для конкретного використання і проводиться дворівневий синтез таких похідних.

В першому випадку спочатку отримують алкіл(арил)імід 4-галоген-, 4-нітро- або 4-сульфо-нафталенової кислоти. Такі похідні легко вступають у реакцію нуклеофільного заміщення з амінами в полярних органічних розчинниках. Потім отримані напівпродукти конденсують з вторинним аміном у висококиплячих розчинниках згідно з методикою 1 (див. рис. 6) [26].

За іншою методикою роблять навпаки [27]. Спочатку отримують діалкіламінонафталеновий ангідрид, а потім вводять його в конденсацію з алкіл-(арил)аміном в середовищі полярного розчинника (спирти, кислоти тощо) (методика 2) (див. рис. 7).

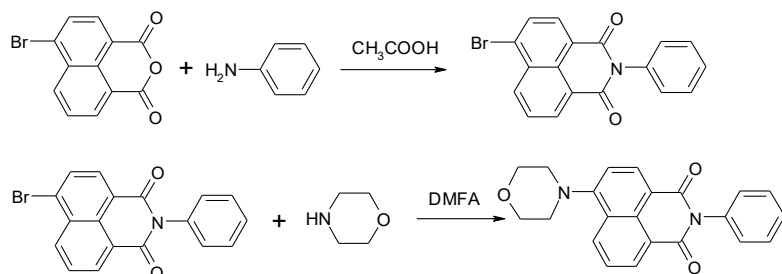


Рис. 6. Схема отримання 4-морфоліно-N-фенілнафталіміді за методикою 1

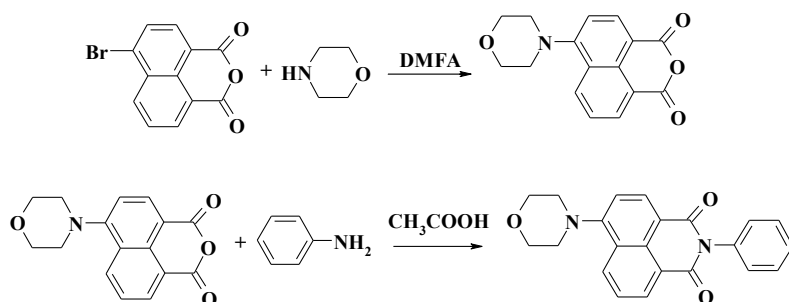


Рис. 7. Схема отримання 4-морфоліно-N-фенілнафталіміді за методикою 2

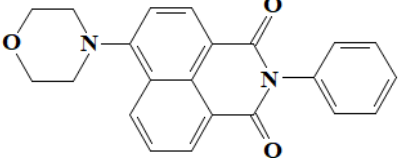
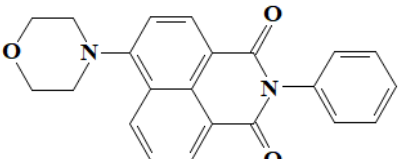
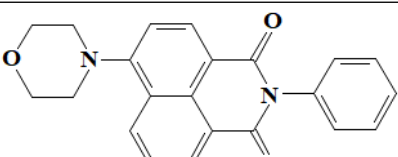
Вищенаведені методики отримання похідних 4-діалкіламінонафталімідів являються двостадійними. Такий підхід призводить до додаткових втрат кінцевого продукту. В обох випадках вихід кінцевого продукту після очищення не перевищує 50–60 %.

Будова вторинної аміногрупи суттєво позначається на стійкості отриманих люмінофорів до УФ-випромінювання. За нашими попередніми дослідженнями найбільш перспективним замісником являється морфоліновий, піперидиновий та піперазиновий цикли. Найбільш перспективним, завдяки доступності, є залишок морфоліну, який випускається в промислових масштабах.

В процесі виконання даної роботи розроблені дві технології одностадійного синтезу 4-діалкіламінонафталімідів [26; 27].

Таблиця 2

## Виходи, температура плавлення і дані елементного аналізу синтезованих сполук

Сполука	Вихід, %	T <sub>пл.</sub> , °C	Елементний аналіз		
			Знайдено N, %	Брутто- формула	Вираховано N, %
	92	254–255	7.71 7.74	C <sub>22</sub> H <sub>18</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.82
	86	237–238	8.47 8.45	C <sub>18</sub> H <sub>19</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	8.56
	85	240–241	8.13 8.10	C <sub>19</sub> H <sub>21</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	8.21

Перша з них передбачає те, що спочатку 4-бромнафталевий ангідрид кип'ятять в інертному розчиннику в якому знаходиться вторинний амін на протязі 5-6 годин, після чого в реакційну масу додається первинний ароматичний або аліфатичний амін. Потім суміш кип'ятять ще 3–4 години і виділяють відповідний нафталімід згідно з методикою 3. За другою технологією 4-бромнафталевий ангідрид кип'ятять у вторинному аміні на протязі 4–5 годин, в реакційну масу додають оцтову кислоту і первинний амін. Реакційну суміш витримують при кипінні 5–6 годин, і виділяють кінцевий продукт (методика 4).

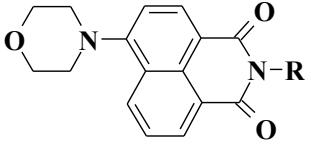



В якості первинних амінів використовувались анілін, моноетаноламін, амінопропіловий спирт та γ-метоксипропіламін, в якості вторинного аміну – морфолін.

Синтез 4-мофолінонафталімідів здійснювався нами як по відомим методикам для двохстадійного їх отримання, так і за розробленими нами методикам. Для підтвердження ідентичності сполук проведений елементний аналіз, визначені температури плавлення синтезованих люмінофорів. Їх структура підтверджена даними УФ-спектроскопії і результатами елементного аналізу (таблиця 2).

Як показали наші дослідження, розроблені одностадійні методики отримання нафталімідів 4-морфолінонафталевої кислоти (див. табл. 3) дозволяють отримувати кінцеві продукти з виходом 85–92 %.

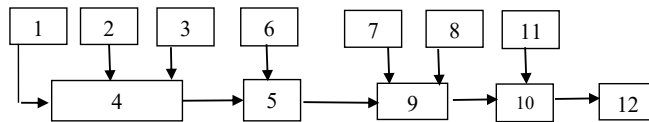
Таблиця 3

## Залежність виходу нафталімідів від використаної методики

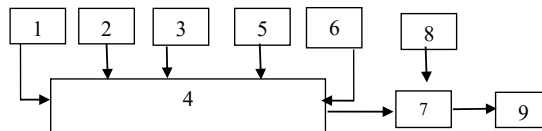
	Методика	Вихід, %
R		
CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	1	55
CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	3	86
CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	4	89
	1	60
	3	90
	4	92
CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OCH <sub>3</sub>	3	87
CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	3	85

Враховуючи, що синтезовані нафталіміди перспективні для багатьох застосувань, ми розробили принципові блок-схеми їх одержання за одно- та двохстадійними технологіями (рисунки 8, 9).

На підставі розроблених блок-схем виробництва нафталімідів розроблені можливі технологічні схеми їх синтезу в умовах впровадження у виробництво (рис. 10, 11).

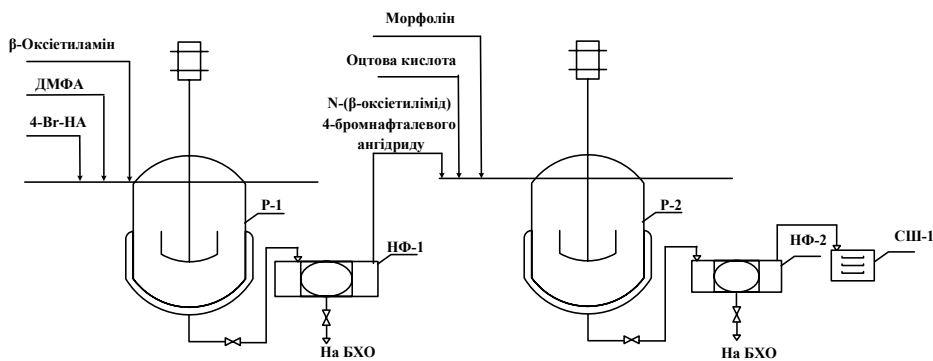


**Рис. 8. Блок-схема отримання 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду за двостадійною методикою**  
 1 – завантаження диметилформаміду (ДМФА); 2 – завантаження 4-Вг-нафталевого ангідриду (4-Вг-НА); 3 – завантаження β-оксіетиламіну; 4 – утворення N-(β-оксіетиліміду) 4-бромнафталевого ангідриду; 5 – фільтрація; 6 – завантаження води на промивання осаду; 7 – завантаження оцтової кислоти; 8 – завантаження морфоліну; 9 – отримання 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду; 10 – фільтрація продукту; 11 – завантаження води на промивання осаду; 12 – сушіння 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду



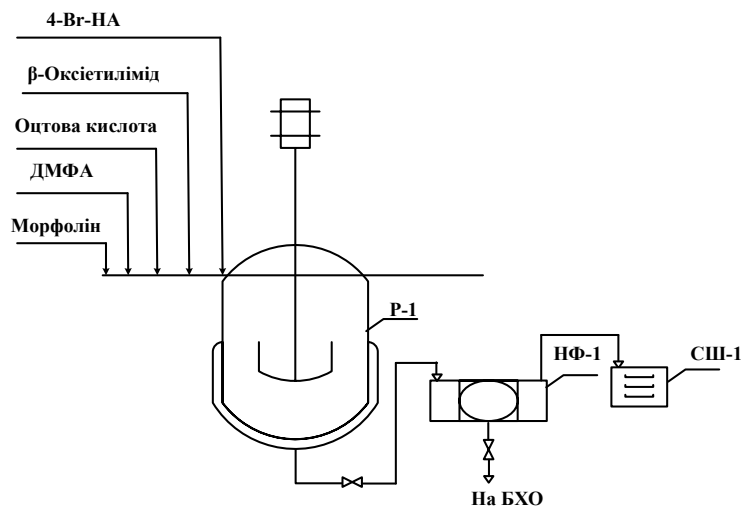
**Рис. 9. Блок-схема отримання 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду за одностадійною методикою**

1 – завантаження диметилформаміду (ДМФА); 2 – завантаження 4-Вг-нафталевого ангідриду (4-Вг-НА); 3 – завантаження морфоліну; 4 – утворення 4-морфолінонафталевого ангідриду; 5 – завантаження оцтової кислоти; 6 – завантаження β-оксіетиламіну; 7 – фільтрація 4-морфоліно-[N-(β-оксі-етиламіно)]-нафталіміду; 8 – завантаження води на промивання осаду; 9 – сушіння 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду



**Рис. 10. Принципова технологічна схема отримання 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду за двостадійною методикою**

P-1 – реактор для отримання N-(β-оксіетиліміду) 4-бромнафталевого ангідриду; P-2 – реактор для отримання 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду; HF-1,2 – нутч-фільтр; СШ-1 – сушарка



**Рис. 11. Принципова технологічна схема отримання 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду за одностадійною методикою**

P-1 – реактор для отримання 4-морфоліно-[N-(β-оксіетиламіно)]-нафталіміду; HF-1 – нутч-фільтр; СШ-1 – сушарка



Як видно з вищенаведеного, технологічна схема одностадійного синтезу при реалізації її у виробництві не передбачає будь-яких ускладнень. А у випадку впровадження, можна використовувати стандартну апаратуру, яка виробляється в Україні.

**Висновки.** Проведені нами дослідження показують ефективність синтезованих люмінофорів

і простоту реалізації одностадійної технології отримання нафталімідів при необхідності впровадження у виробництво. Отримані результати показують, що синтез 4-морфолінонафталімідів за розробленими технологіями є перспективним в умовах дефіциту вихідних продуктів. А з точки зору питань охорони навколишнього середовища, екології та економіки, безумовно, перевершує існуючі методи.

#### Список літератури:

1. Красовицкий Б. М., Болотин Б. М. Органические люминофоры. / под общей ред. Б.М. Красовицкого. Москва : Химия, 1984. 336 с.
2. Distanov V. B., Falaleeva T. V., Myronenko L. S. Daylight pigments on the basis of melaminotoluensulfamideformaldehyde oligomer for enamel colores. *Advanced polymer materials and technologies: theories and practice*. Multi-authored monograph. Kyiv, 2018. С. 42–47.
3. Дистанов В. Б., Мироненко Л. С., Породных А. А., Голубенко Е. А. Дневные флуоресцентные пигменты для эмалевых красок, Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Актуальні проблеми сучасної хімії». Миколаїв : НУК ім. адмірала Макарова, 2019. С. 61–65.
4. Дистанов В. Б., Мироненко Л. С., Бондарев В. В., Васильева В. О., Фалалеева Т. В. Акрилатные дневные флуоресцентные пигменты. *Актуальні проблеми сучасної хімії* : матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців присвячену 100-річчю НУК ім. адм. Макарова. Миколаїв, 2020, С. 28–32.
5. Distanov V. B., Berdanova V. F., Gurkalenko Yu. A., Prezhdo V. V. An alternative approach to the production of fluorescent colored fibres. *Dyes and Pigments*. 2001. Vol. 48, P. 159–163.
6. Дістанов В. Б., Бондарев В. В., Васильева В. О., Дзьобань Т., Мироненко Л. С., Фалалеева Т. В. Піразолінілнафталіміди – флуоресцентні барвники для поліамідних та ацетатних волокон. *Львівські хімічні читання – 2019* : тези доповідей сімнадцятої наукової конференції. Львів, 2019, С. 3 134.
7. Пат РФ № 2017878. Способ получения окрашенного в массе ацетатного и триацетатного волокна / Дистанов В.Б., Тульгук З.Д. и др., Б. И. 1994. № 15. 4 с.
8. Пат РФ № 2010900. Способ получения окрашенного в массе триацетатного или поликапроамидного волокна / Дистанов В.Б., Тульгук З.Д. и др., Б. И. 1994. № 7. 4 с.
9. Пат РФ № 2010901. Способ получения окрашенного в массе ацетатного или триацетатного волокна / Дистанов В.Б., Тульгук З.Д. и др., Б. И. 1994. № 7. 4 с.
10. Переяслова Д. Г., Сальвицкая Л. Н. Применение фенилимида 4-амино-нафталевой кислоты в дневных флуоресцентных пигментах для полиэтилена. *Ж. Прикл. Химии*. 1980. № 53(2). С. 471–473.
11. А. с. СССР 1484826 Композиция для получения флуоресцентного пигмента / Дистанов В. Б., Сальвицкая Л. Н., Чумак Т. В., Шевченко Э. А., Сердечная Т. А., Оpubл. 07.08.89., Бюл. № 21.
12. А. с. 1047838 СССР. Способ определения серебра в растворах / Э.А. Шевченко, В.Б. Дистанов, А.Б. Бланк. Оpubл. 15.10.83, Бюл. № 38, С. 5.
13. Шевченко Э. А., Дистанов В. Б., Бланк А. Б. Люминесцентно-титриметрическое определение серебра с солями 4-диалкиламинонафталевых кислот. *Заводская лаборатория*. 1984. № 50 (6), С. 5–6.
14. Дістанов В. Б., Рошаль А. Д., Дюбко Т. С., Фалалеева Т. В. Дослідження біологічної активності деяких похідних 4-морфолінонафталіміду в якості флуоресцентних зондів. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2014. № 53 (1095). С. 22–28.
15. Дистанов В. Б., Фалалеева Т. В. Синтез и исследование производных 4-морфолинонафталевой кислоты в качестве флуоресцентных зондов. *Научный альманах (химические науки, медицинские науки)*. 2014. № 2(2). С. 100–109.
16. Ромоданова Э. А., Гаврик В. А., Рошаль А. Д., Дистанов В. Б. Изменение конформации САЧ под влиянием замораживания и лазерного излучения по данным флуоресценции производного нафталевой кислоты. *Проблемы криобиологии*. 2000. № 3. С. 28–32.
17. А. с. 1106398 СССР. Активная среда для лазеров на растворах органических соединений / Л.К. Денисов, С.А. Цогоева, Л.М. Мельникова и др. Оpubл. 1.04.84. Бюл. № 7. 4 с.
18. А. с. 1419113 СССР. Производные нафталин-1,8-дикарбоновой кислоты в качестве люминесцентных дихроичных красителей для нематического жидкокристаллического материала / А.Г. Аболин, Б.М. Болотин, В.Б. Дистанов и др. Оpubл. 22.04.88, Бюл. № 5. 16 с.

19. Луговский А. П., Рачкевич В. С., Эрдман М. И. Синтез 4-алкиламинонаф-талимидов и изучение их люминесцентных и ориентационных свойств в жидкокристаллической матрице. *Журнал органической химии*. 1988. № 24(3). С. 625–628.
20. А. с. 1221891 СССР. Пенетрант для люминесцентной дефектоскопии металлических изделий / Л.Я. Малкес, Л.И. Сукиасова, Э.А. Шевченко, В.Б. Дистанов и др. Опубл. 01.12.85, Бюл. № 21. С. 4.
21. А. с. 1384000 СССР. Пенетрант для люминесцентной дефектоскопии / Л.Я. Малкес, Э.А. Шевченко, В.Б. Дистанов и др. Опубл. 22.11.87, Бюл. № 18. С. 4.
22. Окульская, Л. В. (2016). Нетрадиционная техника рисования эбру. *Инновационные педагогические технологии: Материалы IV Междунар. науч. конф.* (г. Казань, май 2016 г). Казань, 2016. С. 62–65.
23. Jiříčná Š. Ebru art [Электронный ресурс] / Šárka Jiříčná. URL: <https://blog.roooya.cz/clanek/113/>.
24. Дістанов В. Б., Бондарев В. В., Васильєва В. О., Дзьобань Т. В., Мироненко Л. С. Синтез довгохвильових органічних люмінофорів для забарвлення синтетичних матеріалів. Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2019). Харків. 2019. Ч. 2. С. 246.
25. Аникин В. Ф., Куприян Д. Г. Алкилирование 4- и 4,5-замещенных нафталимидов в условиях межфазного катализа. *Вісник Одеського національного університету. Сер. Хімія*. 2003. № 8(4). С. 235–242.
26. Vojinovic V., Konstantinovic T. Synthesis of polymerizable 1,8-naphthalimide dyes containing hindered amine fragment. *Dyes and Pigments*. 2002. № 54(3). С. 239–245.
27. Красовицкий Б. М., Шевченко Э. А., Дистанов В. Б. Синтез и люминесцентные свойства 4-замещенных нафталинового ангидрида и нафталимида. *Журн. орг. химии*. 1983. № 6. С. 1305–1308.
28. Кадочкіна В. В., Дістанов В. Б., Фалалєєва Т. В., Мироненко Л. С. Новий підхід до синтезу 4-морфолінонафталімідів. Тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2021). Харків, 2021. Ч. 2. С. 158.
29. Distanov V., Myronenko L., Falaleeva T., Uspenskiy B. A new approach to the synthesis of 4-dialkylaminonaphthalimides. *Abstract EastWest Chemistry Conference*. Lviv, 2018. P 079. P. 160.

#### **Distanov V.B., Myronenko L.S., Kadochkina V.V., Shkolnikova T.V. IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING 4-MORPHOLINONAPHTHALIMIDES**

*This work is devoted to the improvement of the technology for obtaining 4-morpholinonaphthalimides, which are widely used in various fields of science and technology. As we know, for obtaining such derivatives with the purpose of organic luminophores with specific properties synthesis; it is often used two-step method, which is based initially on obtaining 4-halogen-naphthalimide, its isolation from reaction mixture, and its subsequent interaction with morpholine, or vice versa. At first, 4-morpholinonaphthalic anhydride is obtained and then it is transformed into corresponding naphthalimide by reaction with primary aromatic or aliphatic amines. Yield of the final product by both these steps is 50–60 %. In addition, these methods lead to the appearance of a significant amount of liquid waste products, which can cause significant harm to the environment. In the process of work, we developed a new approach to the one-step synthesis of 4-substituted naphthalic acid derivatives. Two approaches were developed which allow obtaining final products without isolation of precursors, which were obtained at the previous stage. This ensures that yield of the end products is increased up to 85–92 %. Bearing in mind, that synthesized naphthalimides are promising for many applications, we have developed principle block diagrams of their production by one- and two-stage technologies. Based on the developed block diagrams of naphthalimides production, we proposed possible technological schemes for their synthesis in the conditions of implementation into full-scale production. Technology scheme of single-stage synthesis subject to its implementation in large-scale production does not include any complications and allows to use standard equipment, which is produced in Ukraine. Proposed technology provides reduction of waste materials by about two times and reduction of the technological equipment amount subject to production organization, which is advantageous from the environmental and economic point of view.*

**Key words:** 4-Bromonaphthalic anhydride, 4-morpholinonaphthalimide, primary and secondary amines, one-stage synthesis, block diagram, manufacturing scheme.

УДК 614.258.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/33>**Єфімова В.Г.**

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

**Пилипенко Т.М.**

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

## ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЦЕПТУРНИХ СКЛАДІВ НОВИХ ВИДІВ ТУАЛЕТНОГО МИЛА

*Визначено, що туалетні мила відносяться до косметичних засобів як продукти, що наносяться на поверхню шкіри з метою її очищення, прикраси, підвищення її привабливості або зміни зовнішнього вигляду, але без зміни структури та функції організму і покликані очищати шкіру від забруднення, відповідно до реєстру стоять децю осторонь, хоча у час, нашої країні, їх відносять до групи косметичних виробів.*

*Попередніми дослідженнями було зроблено важливе відкриття в галузі біології, хімії та медицини, що дозволило сформулювати нові погляди на шкіру та процеси, що відбуваються в ній, а також зростання освіченості покупців, які стали пред'являти до косметики та туалетного мила високі вимоги, зумовили переверт у косметичному та миловарінні. На даний час, туалетні мила стали виходити за вузькі рамки, окреслені директивою FDA. З'ясовано, що туалетні мила входять до складу космецевтичних препаратів, які впливають на фізіологічні процеси у шкірі. Технологія твердого туалетного мила залишається практично незмінною, однак, варіації жирової сировини, різних біологічно активних добавок у рецептурах даних виробів забезпечують милу актуальність серед косметичних продуктів. Поряд з цим, на підставі маркетингових досліджень, зроблених з метою з'ясування реального співвідношення ціна-якість-зовнішній вигляд туалетного мила на ринку України було показано, що гідним конкурентами українським виробникам туалетного мила є імпорتنі виробники. Дослідження показали, що відсутність вітчизняної сировинної бази для миловаріння, створює тенденцію використання імпоротної сировини вітчизняними виробниками, а ціни на останнє перевищує вартість імпортного туалетного мила на нашому ринку, що створює нерівні умови на українському ринку для вітчизняної продукції.*

*В наших дослідженнях показано, що однією з рекомендацій щодо усунення прориву у питанні конкурентоспроможності українського туалетного мила є розширення асортименту, випуску нових видів конкурентної продукції. Отже в нашому дослідженні було створено рецептуру конкурентного туалетного мила, виготовленого з натуральної сировини, що містить комбіновані біологічно активні речовини у вигляді добавок, що надають виробу функціональні властивості, а також удосконалення технології виготовлення туалетного крем-мила.*

**Ключові слова:** крем-мило, число омилення, йодне число, жирова рецептура, піноутворення, миюча здатність.

**Постановка проблеми.**

Відомо, що виробництво сучасного туалетного мила це автоматизований хімічний процес де використовуються різні ароматні добавки, барвники та засоби дезінфекції.

При виготовленні якісних сортів туалетних мил використовують природні жири тваринного та рослинного походження, синтетичні жирні кислоти, луѓи, допоміжні матеріали, запашні речовини, лікувально-профілактичні добавки, барвники, компоненти, що пережирюють та ін. [1].

За класичною рецептурою при виробництві туалетних мил використовують тваринні жири такі як яловичий та баранячий. Ці жири містять

40–60% насичених високомолекулярних жирних кислот (пальмітинової та стеаринової, та ненасиченої олеїнової кислоти 36–55%).

Відомо, що замість тваринних жирів при виробництві туалетних мил можна використовувати жири морських тварин та риб, які спочатку гідрогенізують та отримують твердий жир – сало-мас. Ця жирова сировина окрім високомолекулярних жирних кислот містить воски, лауринову та міристинову кислоти.

Поряд з використанням сировини тваринного походження використовують рослинну сировину такі як рідкі та тверді олії. У якості твердої олії використовують кокосову та пальмоядрову, які

місяць у своєму складі до 52% лауринової та до 19% міристинової кислот. Ці олії у рецептурі мила забезпечують пластичність під час оброблення, високу розчинність, інтенсивне піноутворення. Вміст цих олій у милі становить в діапазоні 25–40%.

Рідкі рослинні олії, що використовуються у рецептурі мил використовуються у якості пережирюючої добавки.

На теперішній час при виробництві туалетних мил в Україні в основному використовують жирозамінники (синтетичні жирні кислоти, каніфоль, нафтові кислоти) безперервним методом, що забезпечує ефективність перебігу технологічного процесу та якість отриманого продукту. При цьому слід зауважити, що використання натуральної сировини дозволяє отримати більш якісну продукцію.

Отже, вдосконалення рецептури туалетного мила, де у якості основних компонентів буде використовуватись природна сировина є актуальною задачею.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Космецевтика – це напрямок, що утворився на стику косметології, фармакології та традиційної медицини [2; 3]. Космецевтичні тверді мила мають позитивні сторони, що пов'язані з їх вирішальною фармакологічною дією і є основою космецевтичних засобів. Новий напрямок передбачає, що в їх рецептурі присутні лише природні компоненти та різноманітні лікувально-профілактичні добавки натурального походження, що надають їм задані лікувально-профілактичні характеристики.

В дослідженнях [4] представлено дослідження де використання туалетних мил з сировини природного походження усувають багато дерматологічних ефектів шкіри. Автори роботи [5] показують, свідчать про що додавання в рецептуру туалетних мил лікувально-профілактичних добавок не впливає на технологічний процес, а також якість готової продукції.

При цьому у науковій літературі, що знаходиться у відкритому доступі відсутні дані про фізико-хімічні показники туалетних мил, які виготовленні з використанням проривних компонентів.

#### **Постановка завдання.**

Метою нашої роботи було:

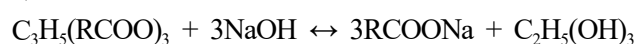
- обґрунтування вибору жирової сировини та біологічно активних речовин, які можуть бути використані у вигляді добавок до туалетного мила космецевтичного призначення;
- розрахунок показників жирової сировини при вдосконаленні рецептури туалетного мила;

– дослідження фізико-хімічних показників космецевтичного мила оновленої рецептури.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Технологічні стадії отримання туалетного мила складаються з наступних стадій:

– омилення, якому відповідають хімічні реакції:



– повного висолювання мильного клею з отриманням ядра та підмильного луґу;

– шліфування ядра шляхом розварки ядра, що відділилося і перетворюванням його в мильний клей з наступним частковим висолюванням;

– відстоювання.

Мінеральні олії, що входять до складу туалетного мила, діють як пом'якшувальні засоби, мають хороші змашувальні властивості, що робить шкіру м'якшою і гладкою. Вони ідеально підходять для сухої чи алергічної шкіри. Крім того, це дуже стабільні сполуки, які діють лише на поверхні. До цієї групи відносяться, зокрема, парафінове масло та вазелін.

Вони є продуктами перегонки нафти, яка пройшла ретельне очищення. Вони мають зволожуючу дію і використовуються людьми з atopічним дерматитом або алергією. З мінеральними оліями також пов'язані помилкові уявлення про те, що вони токсично впливають на шкіру і накопичуються у внутрішніх органах, таких як нирки або печінка. Проте не слід забувати, що кожна сировина має пройти оцінку безпеки. Якби це була науково підтверджена інформація, такі речовини були б допущені до застосування у косметиці. Крім того, мінеральні олії використовуються у виробництві мила протягом багатьох років, завдяки чому їх токсикологічні властивості добре відомі.

Останнім часом можна відзначити тенденцію, що зростає, пов'язану зі створенням натуральної косметики так званої космецевтики. Крім того, виробництво натурального мила невеликими місцевими підприємствами стає все більш популярним та цінним ремеслом.

Склад натурального мила заснований на омиленних оліях, а також містить натуральні барвники, ефірні олії та інші трав'яні добавки, які забезпечують додаткові властивості, що доглядають.

Процес виробництва мила, метою якого є отримання якнайбільше натурального продукту з цінними властивостями, здійснюється холодним методом. Він полягає в тому, що жири змішуються при нижчій температурі. Це простий, але трудомісткий процес.

Для виготовлення туалетного мила використовують природні жири тваринного і рослинного походження, синтетичні жирні кислоти, луѓи, допоміжні матеріали, барвники, запашні речовини, актиоксиданти, пережирюючі, дезінфікуючі та лікувально-профілактичні добавки. Якість мила залежить від якості жирів та олій, використаних для його одержання. Особливо високі вимоги до кольору, запаху та вмісту домішок висуваються при виробництві туалетного мила.

Для його виробництва найчастіше використовують яловичий, баранячий та кістковий топлений жири. У них міститься 40-60% насичених високомолекулярних жирних кислот, в основному пальмітинової та стеаринової, та 36-55% ненасиченої олеїнової кислоти. Найкращим з них для виробництва туалетного мила є яловичий жир.

Жири морських тварин та риб при виробництві мила використовуються у гідрогенізованому вигляді (від лат. «пуаго-геніум» – водень). При обробці їх воднем ненасичені жирні кислоти, що входять до складу жиру, відновлюються до насичених кислот, а консистенція жиру з рідкої перетворюється на тверду. Такий жир називається саломас. Китовий саломас поряд з високомолекулярними жирними кислотами містить значну кількість міристинової ( $C_{13}H_{27}COOH$ ) кислоти, що робить його допустимим компонентом жирової рецептури туалетного мила. Кашалотовий саломас завдяки вмісту в ньому восків, лауринової ( $C_{12}H_{23}COOH$ ) та міристинової кислот застосовується при варінні спеціального мила для миття у морській твердій воді.

Якість жирової сировини характеризується такими показниками як титр, число омилення та йодне число.

Число омилення характеризує загальну кількість вільних та пов'язаних жирних кислот у жирі та виражається кількістю гідроксиду калію (мг), необхідних для омилення ацилгліцеридів та подальшої нейтралізації вільних та пов'язаних жирних кислот, що містяться в 1 г жиру (мг КОН/г жиру).

У поєднанні з кислотним числом воно служить показником ступеня окисного псування жиру, що супроводжується накопиченням низькомолекулярних кислот, і є показником, що нормується.

Стійкість жирів та масел до окиснення обумовлена положенням, геометричною конфігурацією та кількістю подвійних зв'язків, що входять до жирних кислот. Чим вища степінь ненасиченості (велика кількість подвійних зв'язків  $C=C$ ), тим нижча її природня окисна стабільність.

Йодне число є простою і швидкою методикою оцінки стану жирів та масел. Це важливий показник жирів, що характеризує склад ненасичених зв'язків, але не визначає окремі жирні кислоти. Методи визначення йодного числа є доволі точними і забезпечують отримання результатів дуже близьких до теоретично розрахованих, за винятком випадків наявності спряжених подвійних зв'язків або розташування подвійного зв'язку поруч з карбоксильною групою.

За рецептурою для виробництва туалетного мила високої якості використовують світлі топлений жири, що відповідають складу еталонної жирової суміші, яка наведена у Таблиці 1.

Ця суміш містить у своєму складі необхідну кількість пальмітинової, міристинової, стеаринової, лауринової та олеїнової кислот, що створює сприятливі умови для механічної обробки, мила, яке було зварене.

Мило, що отримане з жирової сировини такого складу має значну твердість, стійку піноутворюючу здатність та високоюю активність, при цьому воно не розтріскується та не розпливається при зберіганні та використанні, що відповідає необхідним фізико-хімічним та споживчим вимогам. При цьому воно має тривалий період зберігання, що свідчить про його стійкість до окиснення.

При виробництві туалетного мила допускається використання у складі жирової сировини деяких жирозамінників, таких як саломас та баранячий жир. Це дозволяє замінити частину коштовного у харчовому відношенні яловичого жиру. При цьому зберігається якість готового продукту, собівартість кінцевого продукту зменшується.

Таблиця 1  
Склад еталонної суміші жирової сировини для виробництва туалетного мила

Жирова сировина	Титр, °С	Число омилення, мг КОН/г	Йодне число, мг КОН/г	Вміст компонентів в суміші, %
Жир яловичий топлений	38–48	193–200	32–47	80–85
Олія кокосова	21–26	7–10,5	251–264	15–20

З цією метою нами було запроваджено дослідну рецептуру туалетного мила з заміниками яловичого жиру.

Мило, з рецептурою що досліджувалась наведена у Таблиці 2.

Далі ми провели розрахунки показників жирової сировини, що була запропонована нами у складі рецептури експериментального туалетного мила.

Титр жирової суміші визначався згідно з рівнянням у °С:

$$T_{CM} = \frac{t_{\text{жжж}} \cdot Pr_{\text{жжж}} + t_{\text{км}} \cdot Pr_{\text{км}} + t_{\text{жсм}} \cdot Pr_{\text{жсм}}}{100}, \quad (1)$$

де  $t_{\text{жжж}}, t_{\text{км}}, t_{\text{жсм}}$  – титр відповідно тваринного жиру, саломаса, кокосової олії, рідкої олії, °С;  $Pr_{\text{жжж}}, Pr_{\text{км}}, Pr_{\text{жсм}}$  – кількість в жировій суміші відповідного жиру, саломасу, кокосової олії, рідкої олії, %.

Число омилення було розраховано як:

$$ЧО_{\text{см}} = \frac{ЧО_{\text{СЖК}} \cdot Pr_{\text{СЖК}} + ЧО_{\text{сал}} \cdot Pr_{\text{сал}} + ЧО_{\text{жсм}} \cdot Pr_{\text{жсм}} + ЧО_{\text{жжж}} \cdot Pr_{\text{жжж}}}{100} \quad (2)$$

де  $ЧО_{\text{СЖК}}, ЧО_{\text{сал}}, ЧО_{\text{жсм}}, ЧО_{\text{жжж}}$  – число омилення жирних кислот відповідно синтетичних, саломасу, рідких олій, тваринного жиру.

Йодне число визначали як

$$ЧЙ_{\text{см}} = \frac{ЧЙ_{\text{СЖК}} \cdot Pr_{\text{СЖК}} + ЧЙ_{\text{сал}} \cdot Pr_{\text{сал}} + ЧЙ_{\text{жсм}} \cdot Pr_{\text{жсм}} + ЧЙ_{\text{жжж}} \cdot Pr_{\text{жжж}}}{100}, \quad (3)$$

де  $ЧЙ_{\text{СЖК}}, ЧЙ_{\text{сал}}, ЧЙ_{\text{жсм}}, ЧЙ_{\text{жжж}}$  – йодне число жирних кислот відповідно синтетичних, саломасу, рідких олій, тваринного жиру.

Результати розрахунків наведені у Таблиці 3.

Для отримання мила експериментального складу нами було зважено компоненти жирової суміші, луку та води. Далі на водяній бані

ми розтоплювали жири, а потім ввели розчин луку. Отриману масу змішали до однорідності і варили на водяній бані 3 години за температури 85–90 °С. Готовність мила перевіряли шляхом вимірювання показника рН, яке повинно було бути в межах 6–9. Далі готову мильну масу виливали у форму та залишали її застигати та вистоюватись на протязі місяця.

Далі отримане туалетне мило було досліджено за фізико-хімічними показниками такими як органолептичні показники, зовнішній вигляд та колір, якісне число, визначення первинного об'єму піни.

Органолептичні показники визначалися за температури мила не нижче 18 °С. Консистенцію шматка мила визначають на дотик легким натисканням пальцями, не допускаючи деформації шматка. Колір мила визначали візуально, а запах – органолептичним методом безпосередньо після розрізання аналізованого шматка на частини. Зовнішній вигляд і колір рідкого туалетного мила визначали переглядом проби, поміщеної тонким, рівним шаром на предметне скло або аркуш білого паперу. Запах туалетного мила визначають дегустацією 10 % водного розчину (температура води 40–50 °С).

Якісне число (КЧ), в грамах обчислювали за формулою:

$$КЧ = \frac{X \cdot m}{m_1}, \quad (4)$$

де  $X$  – маса жирних кислот в 100 г мила;  $m$  – фактична маса шматка, г,  $m_1$  – номінальна маса шматка, г.

Дані досліджень якості експериментального мила наведено у Таблиці 4.

Таблиця 2

Рецептура жирової сировини туалетного мила, що досліджувалась

Жирова сировина	Титр, °С	Число омилення, мг КОН/г	Йодне число, мг КОН/г	Вміст компонентів в суміші, %
Жир яловичий	41	197	39	50
баранячий	39	196	55	10
Саломас	39	199	65	15
Олія кокосова	23	254	8	15

Таблиця 3

Показники жирової сировини туалетного мила з експериментальною рецептурою

Жирова сировина	Титр, °С	Число омилення, мг КОН/г	Йодне число, мг КОН/г
Еталонна	39,6	163,6	77,7
Дослідна	37,5	203,1	55
Оптимальна	34–42	205	45–60

Таблиця 4

**Фізико-хімічні показники мила експериментального складу**

Найменування показника	Характеристика та норма
Зовнішній вигляд	На розрізі однорідне, на поверхні мила відсутні тріщини, смуги, прошарки, плями
Колір, запах	Відповідає милу встановленому у технічних вимогах
Якісне число (масова доля жирних кислот у перерахунку на масу шматка 100г), г, не менш	75
Початковий об'єм піни, см <sup>3</sup> , не менш	350

Отже, дані досліджень свідчать, що мило запропонованої рецептури відповідає стандартам якості, що висуваються до туалетних мил.

**Висновки і пропозиції**

Запропонована жирова рецептура характеризується показниками близькими до оптимальних, що дозволяє використовувати такий компонентний склад сировини для виробництва основи туалетного мила.

**Список літератури:**

1. Ostrikov A.N., Zheltoukhova E.YU., Kopylov M.V., Bolgova I.N., Lobacheva N. N. Development of toilet soap production technology for therapeutic and prophylactic purposes. 2021. The 17<sup>th</sup> international symposium on solid oxide fuel cells (SOFC – XVII). Bristol. P. 78–85.
2. Draeos Z., Cosmeceuticals: What's Real, What's Not. 2019. Dermatologic Clinics. № 1. P. 107–115.
3. Puglia C., Santonocito D. 2019. Cosmeceuticals: Nanotechnology-Based Strategies for the Delivery of Phytocompounds. *Current Pharmaceutical Design*. Vol. 25 (21). P. 2314–2322
4. Xie P. J., Huang L. X., Zhang C. H., Ding S. S., Deng Y. J., Wang X. J. 2018. Skin-care effects of dandelion leaf extract and stem extract. *Antioxidant properties, tyrosinase inhibitory and molecular docking simulations. Industrial crops and products*. № 11. P. 238–246.
5. Goik U., Goik T., Zaleska I., 2019. The Properties and Application of Argan Oil in Cosmetology. *European Journal of Lipid Science and Technology*. № 4. P. 78–91.

**Yefimova V.G., Pilipenko T.M. REPAIR OF RECIPE WAREHOUSES IN NEW VIEWS OF TOILET SOAP**

*It is determined that toilet soaps are cosmetics as products that are applied to the skin surface to cleanse, beautify, enhance its attractiveness or change its appearance, but without changing the structure and function of the body and are designed to cleanse the skin from contamination. somewhat aside, although at the time, in our country, they belong to the group of cosmetic products.*

*Previous research has made important discoveries in the field of biology, chemistry and medicine, which has led to the formation of new views on the skin and the processes occurring in it, as well as increasing education of buyers who began to make high demands on cosmetics and toilet soap. in cosmetic and soap making. Currently, toilet soaps have begun to go beyond the narrow framework outlined by the FDA directive. Toilet soaps have been found to be part of cosmetic products that affect physiological processes in the skin. The technology of solid toilet soap remains virtually unchanged, however, variations of fatty raw materials, various biologically active additives in the recipes of these products provide a nice relevance among cosmetic products. In addition, on the basis of marketing research conducted to determine the real price-quality-appearance of toilet soap in the Ukrainian market, it was shown that worthy competitors to Ukrainian manufacturers of toilet soap are imported manufacturers. Studies have shown that the lack of domestic raw materials for soap making creates a trend of using imported raw materials by domestic producers, and prices for the latter exceed the cost of imported toilet soap in our market, which creates unequal conditions in the Ukrainian market for domestic products.*

*Our research shows that one of the recommendations for eliminating the breakthrough in the issue of competitiveness of Ukrainian toilet soap is to expand the range, the release of new types of competitive products. Therefore, in our study we created a recipe for competitive toilet soap made from natural raw materials, containing combined biologically active substances in the form of additives that give the product functional properties, as well as improving the technology of toilet cream soap.*

**Key words:** cream-soap, saponification number, iodine number, Fat recipe, foaming, detergency.

**Жданюк Н.В.**

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

**Лещенко П.В.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ, ТЕРМІЧНИХ ТА СОРБЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОНТМОРИЛОНІТУ З НАНЕСЕНИМ ШАРОМ НАНОРОЗМІРНОГО НУЛЬ-ВАЛЕНТНОГО ЗАЛІЗА

У роботі досліджена структура залізовмісного сорбенту на основі монтморилоніту за допомогою рентгенофазового аналізу (РФА). Результати РФА залізовмісного композиту підтвердили успішне закріплення нанорозмірного нуль-валентного заліза поверхні монтморилоніту. Для вивчення морфології поверхні монтморилоніту, нанорозмірного нуль-валентного заліза і залізовмісного композиту використано скануючу електронну мікроскопію. В результаті досліджень підтверджено, що частинки монтморилоніту мають форму масивних пластин. Для зразка  $Fe^0$  спостерігається утворення сферичних частинок, які з'єднуються одна з одною у ланцюги. Для залізовмісного композиту на основі монтморилоніту спостерігаємо морфологію схожу із монтморилонітом, але слід відмітити доволі рівномірне розміщення часточок нанорозмірного нуль-валентного заліза на поверхні монтморилоніту. Термічний аналіз залізовмісного композиту підтвердив, що жодних перетворень у зразку до  $170\text{ }^\circ\text{C}$  крім виділення фізично зв'язаної води не відбувається. Це дозволило визначити температурні інтервали сушіння матеріалу. При температурі вище  $950\text{ }^\circ\text{C}$  відбувається структурне перетворення монтморилоніту, що приводить до виникнення нових фаз: кварцу, кордієриту, естатиту, периклазу, шпінелі. Отримані дані дозволяють стверджувати, що утилізацію відпрацьованих сорбентів можна проводити за керамічною технологією. Крім того, дані результату термічного аналізу підтверджують, що окиснення нанорозмірного нуль-валентного заліза відбувається за  $320\text{ }^\circ\text{C}$ , а окиснення заліза у зразку залізовмісного композиту починається за  $280\text{ }^\circ\text{C}$ , що опосередковано свідчить про зменшення розміру його часточок. Таким чином, можна стверджувати, що розміри частинок  $Fe^0$  утворені на поверхні монтморилоніту значно меншого розміру ніж частинки  $Fe^0$  отримані із чистих розчинів. Ці дані підтверджують результати РФА. Сорбційні дослідження підтвердили, що синтезований залізовмісний сорбент здатний вилучати іони  $Cr(VI)$  та  $Co(II)$  з водних середовищ, при початковій концентрації іонів  $1\text{ мг/дм}^3$ , до значень нижчих за гранично допустимі концентрації.

**Ключові слова:** рентгенофазовий аналіз, термічний аналіз, адсорбція, скануюча електронна мікроскопія, хром (VI), кобальт (II).

**Постановка проблеми.** Одним із важливих екологічних завдань є попередження скиду промислових стічних вод приладобудівних та гальванічних виробництв, що містять іони важких металів в концентраціях вищих, за гранично допустимі. Такі важкі метали як хром та кобальт відносяться до II класу небезпеки, негативно впливають на живі організми, оскільки проявляють високі токсичні властивості. Тому такі виробництва потребують розробки ефективних технологій для вилучення іонів важких металів із водних середовищ.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Найбільш перспективним методом очищення вод-

них середовищ, забруднених іонами важких металів та радіонуклідів є застосування сорбційних технологій [1]. Досвід використання в якості сорбентів глинистих мінералів показав, що їх висока дисперсність та наявність на їх поверхні великої кількості сорбційних центрів забезпечує високі адсорбційні властивості та здатність до катіонного обміну [2]. При цьому найвищі сорбційні властивості мають мінерали монтморилонітової групи, великі поклади яких розвідані та розробляються в Україні. Однак, сорбенти на основі глини практично не здатні до видалення забруднювачів, що присутні у водах у вигляді аніонів, які в ряді



випадків є найбільш небезпечними (комплекси урану, хрому, тощо) [2].

Нанесення шару  $Fe^0$  на поверхню шаруватих та шарувато-стрічкових силікатів дозволяє отримати сорбенти з унікальними властивостями [3]. Ефективність залізовмісних композитів в процесах очищення водних середовищ від різноманітних забруднень відбувається за рахунок сорбційного та відновлювального механізмів [4; 5]. Таким чином, забруднюючі речовини перетворюються на менш шкідливі, за рахунок відновлення і утворюються нерозчинні або менш шкідливі сполуки. Наприклад, іони Cr (VI) відновлюються до Cr (III).

Використання монтморилоніту у якості підложки для  $Fe^0$  дозволяє суттєво знизити здатність нанорозмірного нуль-валентного заліза до агрегації [6]. Не зважаючи на це, існують суттєві обмеження щодо широкого застосування залізовмісних композитів у водоочищенні. Так, нанодисперсне  $Fe^0$  має схильність до окиснення. Дані процеси починають відбуватися на етапі синтезу  $Fe^0$ -МТ, що зменшує активність і ефективність сорбенту і подальше використання його в технологічних процесах [6]. Це визначає актуальність дослідження та дозволить проводити спрямований синтез ефективних залізовмісних сорбентів на основі природних силікатів із заданими властивостями і структурою.

#### Формулювання цілей статті

**Мета дослідження** – дослідження властивостей залізовмісного сорбенту на основі монтморилоніту з метою встановлення умов направленої синтезу сорбентів.

Для виконання поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

дослідити структуру залізовмісного композиту, вивчити його термічні та сорбційні властивості по відношенню до аніонів важких металів на прикладі хрому (VI) та катіонів на прикладі кобальту (II).

**Виклад основного матеріалу.** Вихідним матеріалом є природний шаруватий силікат – монтморилоніт Черкаського родовища (Україна) із загальною формулою  $(Ca,Na)(Al,Mg,Fe)_2(OH)_2[(Si,Al)_4O_{10}] \cdot nH_2O$ . Хімічний склад мінералу:  $SiO_2$  – 51,9%,  $Al_2O_3$  – 17,10%,  $Fe_2O_3$  – 7,92%,  $MgO$  – 1,18%,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  і  $CaO$  до 2% і  $H_2O$  – 8,78%. Монтморилоніт характеризується найвищою серед глинистих мінералів ємністю катіонного обміну (КОЄ) 1,0 ммоль/г [7].

Для вивчення будови вихідного матеріалу та синтезованих зразків використовували рентгенофазовий аналіз (РФА), скануючу електронну мікроскопію, термічний аналіз. Для дослідження

сорбційних властивостей матеріалів використовували спектрофотометричний метод.

Природний монтморилоніт попередньо переводили у Na-форму по методиці, описаній у роботі (зразок – МТ) [8]. Синтез нанорозмірного нуль-валентного заліза (зразок –  $Fe^0$ ) проводили сульфатним методом, відновленням солі  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  (Merck) боргідридом натрію  $NaBH_4$  (Merck). Аналогічним методом отримували залізовмісний композит з водних дисперсій монтморилоніту (зразок –  $Fe^0$ -МТ) [9]. Масове співвідношення між складовими композиційного сорбенту становило 0,1  $Fe^0$  на 1 монтморилоніту. Сушіння композитів проводили під вакуумом при температурі 80 °С. Для встановлення впливу умов сушіння на ефективність сорбенту, додатково були отримані залізовмісні зразки отримані при висушенні при 60, 80 та 100 °С під вакуумом.

Рентгенівський аналіз було проведено за допомогою дифрактометру ДРОН-3М (Російська Федерація), з системою комп'ютерного сканування та запису дифракційної картини. Також було використане фільтроване  $Cu-K_\alpha$  випромінювання. Розмір частинок був визначений за формулою Шеррера для розрахунку розміру частинок рентгенівських променів:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta},$$

де  $D$  – розмір кристалів,  $k$  – коефіцієнт форми частинок (для сферичних частинок дорівнює 0,9);  $\lambda$  – довжина хвилі рентгенівського випромінювання  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ;  $\theta$  – кут дифракції Брегга та  $\beta$  – повна ширина при половині максимальної інтенсивності піка.

Мікроскопічні дослідження виконано на скануючому електронному мікроскопі РЕМ-106И (Україна). Даний мікроскоп отримує зображення поверхні об'єкту з високою просторовою роздільною здатністю та глибиною різкості у відбитих та вторинних електронах. Для досліджень використовували зразки у порошкоподібному стані, фракцією  $\alpha < 0,1 \text{ мм}$ .

Термогравіметричні дослідження сорбентів проводили на приладі Derivatograph Q-1500 (Угорщина) системи «Паулік-Паулік-Ердей». Зразки аналізували в динамічному режимі. Швидкість нагрівання складала 10 °С/хв. Нагрівання зразка проводили до 1000°С в атмосфері повітря. Маса зразків становила 1500 мг. В якості еталонної речовини використано  $Al_2O_3$ . В експериментах використовувався платиновий тигель. Чутливість за шкалою зміни маси (ТГ) складала 50 мг, за шкалою диференційного нагрівання (ДТА) – 250 мкВ.

В сорбційних експериментах використовували розчин калій дихромат ( $K_2Cr_2O_7$ ) та кобальт(II) хлориду гексагідрату ( $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ) для визначення Cr(VI) та Co(II), відповідно. Сорбцію проводили в статичних умовах при безперервному струшуванні зразків протягом 1 год. (об'єм водної фази складав 50 мл, наважка мінералу 0,1 г, концентрації Cr(VI) та Co(II) в сорбційних експериментах становили  $1 \text{ мг/дм}^3$ ) за стандартними методиками [10; 11]. Сорбційні експерименти проводили при  $pH=7$ . Рівноважну концентрацію металу спектрофотометричним методом (UNICO 2100UV, США) з використанням реагенту дифенілкарбазиду при довжині хвилі 540 нм для хрому та нітрит-солі ( $NO(NO)C_{10}H_4(SO_3Na)_2$ ) при довжині хвилі 520 нм для визначення Co(II).

**Результати дослідження та обговорення.** На рис. 1 представлені дифрактограми неорієнто-

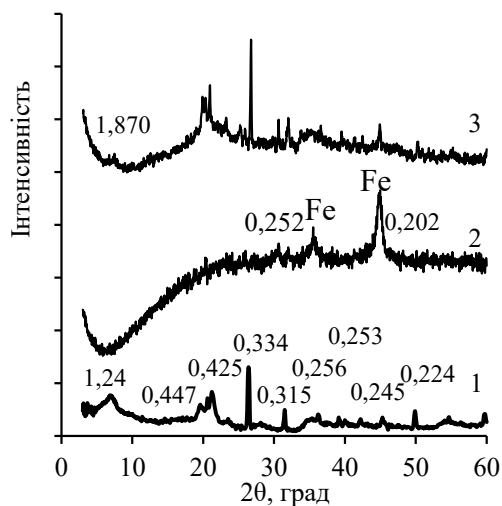
ваних зразків монтморилоніту, нанорозмірного нуль-валентного заліза та залізовмісного композиту на основі монтморилоніту. Для зразка МТ (крива 1, рис. 1) спостерігається серія базальних рефлексів 1,240; 0,315; 0,253 нм та лінії двомірної дифракції – 0,447; 0,256; 0,224 нм, що є характерним для смектитів [12, 13], а вузькі та інтенсивні лінії з міжплощинною відстанню 0,425; 0,334; 0,245 нм відповідають кварцу.

На дифрактограмі зразка  $Fe^0$  (крива 2, рис. 1) спостерігаємо чіткі рефлекси при  $44,9^\circ$  і  $35,8^\circ$  (0,202 та 0,252 нм відповідно), що відповідають кристалічним фазам нуль валентного заліза ( $\alpha$ -Fe) та оксиду заліза (FeO).

На дифрактограмах зразка  $Fe^0$ -МТ (крива 3, рис. 1) також присутні рефлекси при  $44,9^\circ$  і  $35,8^\circ$ , що підтверджує присутність нанорозмірного нуль-валентного заліза у залізовмісному композиті, а також при менших значеннях  $2\theta$  оксиду заліза та гетиту (FeOOH) [14].

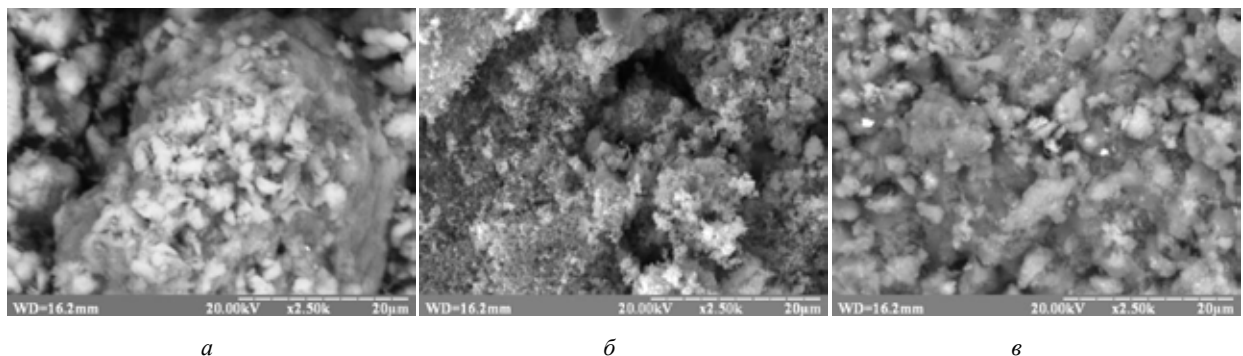
Розмір частинок був визначений за формулою Шеррера по розширенню ліній наполовину максимальної інтенсивності було встановлено, що розмір наночастинок заліза у зразках  $Fe^0$  та  $Fe^0$ -МТ складає 98 та 54 нм, відповідно.

У роботі проведено електронні мікроскопічні дослідження вихідного монтморилоніту та синтезованих матеріалів. Електронний знімок (СЕМ) поверхні МТ представлений на рис. 2, а. На зображенні присутні агрегати частинок монтморилоніту, які мають форму масивних та вигнутих пластин. Для зразка  $Fe^0$  характерне утворення гілкоподібних структур (рис. 2, б). Частинки заліза утворюють наносфери, які з'єднуються одна з одною у ланцюги. Ця лінійна орієнтація пов'язана з магнітними властивостями заліза. Для зразка  $Fe^0$ -МТ (рис. 2, в) спостерігаємо морфологію схожу із зразком МТ та рівномірне розміщення часточок  $Fe^0$  по поверхні монтморилоніту у вигляді окремих агрегатів.



**Рис. 1. Дифрактограми зразків:**

1 – монтморилоніт; 2 – нанорозмірне нуль-валентне залізо; 3 – залізовмісний композит на основі монтморилоніту



**Рис. 2. Результати скануючої електронної мікроскопії:**

а – монтморилоніт; б – нанорозмірне нуль-валентне залізо; в – залізовмісний композит на основі монтморилоніту

Термічний аналіз зразка МТ описаний у роботі [15]. Для зразка МТ на кривій ДТА присутні три ендотермічні ефекти Перший інтенсивний низькотемпературний ефект (50–240 °С) свідчить про виділення адсорбційної і міжпакетної води та дозволяє стверджувати, що характер гідратованих обмінних катіонів відповідає присутності  $\text{Na}^+$ . Два наступних ендоефекти (450–590 °С та 800–920 °С) відповідають виділенню конституційної гідроксильної води. [16]. При температурі вище 950 °С відбувається зміна структури мінералу, що приводить до виникнення нових фаз: кварцу, кордіериту, енстатиту, периклазу, шпінелі. Всі процеси відбуваються з втратою маси зразка.

Результати термічного дослідження зразка  $\text{Fe}^0$  представлені на рис. 3.а. Де представлені зміна маси (крива ТГ), диференційна зміна маси (крива ДТГ) та диференційна крива нагрівання (крива ДТА). Основною кристалічною фазою нанорозмірного заліза є  $\alpha\text{-Fe}^0$ . Його поверхня вкрита оксидами та гідроксидами феруму. Його товщина складає 3÷5 нм. Відповідно до результатів РФА в оксидному шарі  $\text{Fe}^0$  присутній  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  – гематит [16].

У температурному інтервалі 80–120 °С спостерігаються два низькотемпературних ендоефекти з втратою маси, що відповідають видаленню адсорбційної води. Незначний екзоефект при температурі ~300°С пояснюється початком окиснення матеріалу та досягнення температури саморозігріву (320 °С), вище якої відбувається самозаймання порошку.

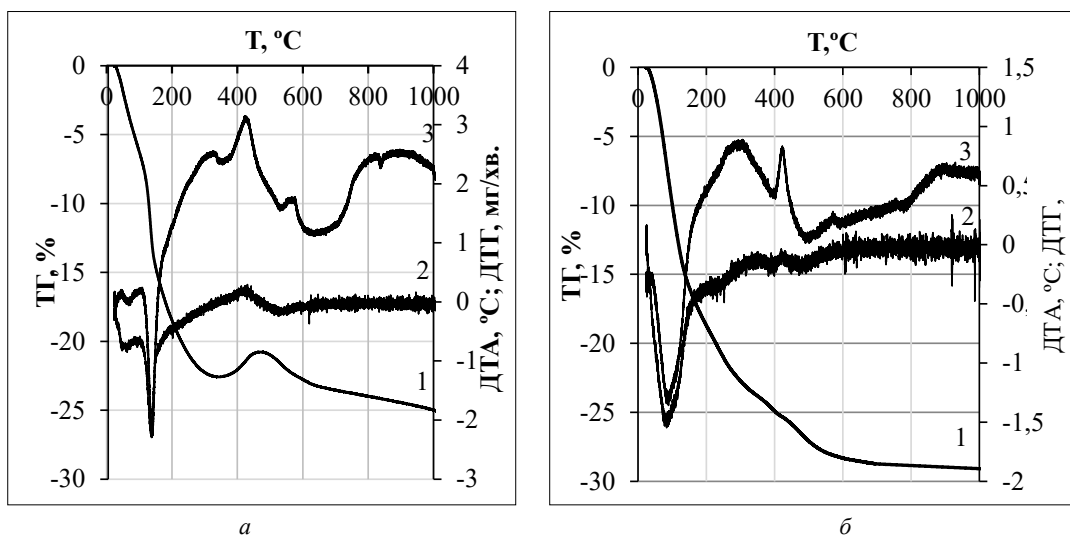
Екзоефекти в температурних інтервалах 350–520 °С та 520-600 °С відповідають процесам окиснення заліза. Спочатку відбувається окис-

нення найменших частинок з утворенням  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Наступне окиснення заліза супроводжується формуванням на його поверхні багатшарової окалини, яка складається з декількох оксидів феруму:  $\text{Fe}_x\text{O}$  (вюстит,  $x=0,836\dots0,954$ ),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (магнетит),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (гематит, маггеміт) [17]. Співвідношення шарів, що формуються в атмосфері повітря у приблизно складає  $\text{FeO}:\text{Fe}_3\text{O}_4:\text{Fe}_2\text{O}_3=100:10:1$  [17; 18]. В температурному інтервалі 350–600 °С спостерігається збільшення маси зразка, що пояснюється окисненням та може свідчити про значний вклад зовнішньої дифузії в макрокінетику реакції [17].

Для зразка  $\text{Fe}^0\text{-МТ}$  (рис. 3.б) в інтервалі температур 50–170 °С спостерігається ендоефект, що відповідає втраті адсорбційної та міжпакетної води. В області температур 170–550 °С спостерігаються накладання ряду екзоефектів, що відповідають процесам окиснення заліза та ендоефектів, що відповідають втрати конституційної води.

Дані процеси відбуваються з втратою маси композиту. При температурі вище 600 °С втрати маси практично не відбувається. Дані результати термічного аналізу підтверджують, що окиснення заліза у зразку  $\text{Fe}^0$  відбувається за 320 °С, а у зразку  $\text{Fe}^0\text{-МТ}$  за 280 °С, що опосередковано свідчить про зменшення розмішу його часточок. Таким чином, можна стверджувати, що розміри частинок  $\text{Fe}^0$  утворені на поверхні монтморилоніту значно меншого розміру ніж частинки  $\text{Fe}^0$  отримані із чистих розчинів. Ці дані підтверджують результати РФА.

Вивчення залежності адсорбційних властивостей від умов сушіння синтезованих зразків представлено у таблиці 1. Результати досліджень



1 – крива ТГ; 2 – крива ДТГ; 3 – крива ДТА

Рис. 3. Результати термічного аналізу зразків  $\text{Fe}^0$  (а) та залізовмісного композиту на основі монтморилоніту (б)

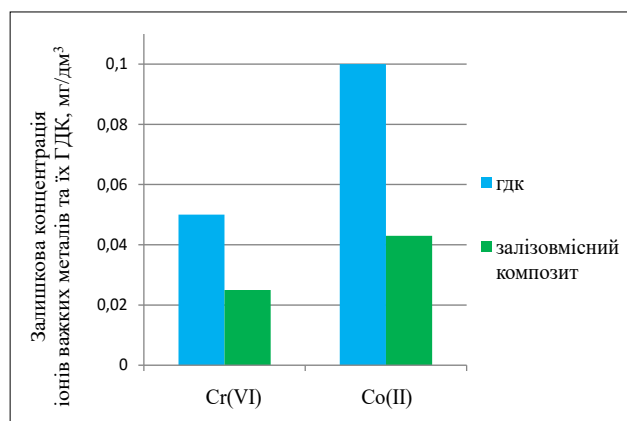


Рис. 4. Залишкові концентрації іонів Cr (VI) після очищення забруднених розчинів залізовмісним композитом при pH=7

підтверджують, що оптимальним режимом сушіння зразків під вакуумом є температура 80 °С. Такі умови забезпечують м'яке сушіння зразка без допуску повітря. Важливо, щоб спиртово-водний розчин у якому міститься дисперсна залізовмісна фаза якомога менший термін перебувала нижче температури кипіння суміші, що призведе до окиснення Fe<sup>0</sup>.

Результати перевірки ефективності сорбенту на модельних водах з концентрацією іонів Cr(VI) та Co(II) – 1 мг/дм<sup>3</sup> представлено на рис. 4.

Дослідження підтверджують, що очищення водних середовищ синтезованими композитами Fe<sup>0</sup>-МТ від іонів Cr(VI) та Co(II) досягли рівня гранично-допустимих концентрацій (ГДК), що складають 0,05 та 0,1 мг/дм<sup>3</sup>, відповідно [19].

Таблиця 1

Сорбційні характеристики матеріалів при C<sub>0</sub>=50 мг/дм<sup>3</sup> в залежності від умов сушіння

Сорбент	Ступінь очищення, %					
	Cr(VI)			Co(II)		
	60 °С	80 °С	100 °С	60 °С	80 °С	100 °С
МТ	31,81	31,77	31,79	51,0	51,3	51,3
Fe <sup>0</sup>	62	68	68	88,7	90	90,4
Fe <sup>0</sup> -МТ	46,5	50,6	51,3	88,6	94,8	95,2

### Висновки

Дослідження структури залізовмісного композиту на основі монтморилоніту підтвердило наявність у його складі Fe<sup>0</sup>. Термічний аналіз властивостей залізовмісних композитів, даних рентгенофазового аналізу та результати скануючої електронної мікроскопії допомогли проводити направлений синтез сорбентів з визначеними властивостями. А також встановити оптимальні умови сушіння зразків.

Термічні дослідження залізовмісного сорбенту підтвердили, що при нагріванні його до 170 °С відбувається лише виділення фізично зв'язаної води. Дані результати можуть бути використанні для розробки промислових та

напівпромислових визначення оптимальних режимів сушіння отриманих сорбентів. Екзотермічний пік на кривій ДТА при температурі 950 °С відповідає кристалізації нових фаз та утворення керамічного черепка. Дані результати підтверджують можливість утилізацію відпрацьованих залізовмісних сорбентів на основі монтморилоніту.

Синтезовані залізовмісні композити здатні вилучати із забруднених водних середовищ до 95,7% іонів Cr (VI) та 97,5% Co(II) при початковій концентрації забрудників 50 мг/дм<sup>3</sup>. Дослідження проведені на модельних водах концентрацією іонів Cr (VI) та Co(II) рівній 1 мг/дм<sup>3</sup> підтверджують очищення водного середовища до рівнів ГДК.

### Список літератури:

1. Алыков Н.М., Павлова А.В., Нгуэн К.З. Сорбционное удаление из воды ионов тяжелых металлов. *Безопасность жизнедеятельности*. 2010. № 4. С. 17–20.
2. Вилучення сполук U(VI) з вод із використанням органоглини А.О. Голембіовський, І.А. Ковальчук, Б.Ю. Корнілович, Н.В. Жданюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2011. № 6. С. 154–158.
3. Ezzatahmadi N. Clay-supported nanoscale zero-valent iron composite materials for the remediation of contaminated aqueous solutions: A review / N. Ezzatahmadi, G. Ayoko, G. Millar, R. Speight, C. Yan, J. Li, S. Li, J. Zhu, Y. Xi / *Chem. Eng. J.* 2017. Vol. 312. P. 336–350. doi: 10.1016/j.cej.2016.11.154
4. Fu F., Dionysiou D., Liu H. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review. *J. Hazard. Mater.* 2014. Vol. 267. P. 194–205.
5. Shahwan T., Uzum C., Eroğlu A.E., I. Lieberwirth. Synthesis and characterization of bentonite/iron nanoparticles and their application as adsorbent of cobalt ions. *Appl. Clay Sci.* 2010. № 47. P. 257–262.

6. Zhang X., Lin S., Lu X.-Q., Yool-Jin Park, Patrick J. Shea. Removal of Pb(II) from water using synthesized kaolin supported nanoscale zero-valent iron. *Chem. Eng. J.* 2010. № 163. P. 243–248.
7. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. Киев: Наукова думка, 1975. 351 с.
8. Zhdanyuk N. Research of chromium (VI) ion adsorption by montmorillonite modified by cationic surfactants. *Технологічний аудит та резерви виробництва.* 2016. № 5. С. 11–15. doi:10.15587/2312-8372.2016.81015.
9. Prus V., Zhdanyuk N. Investigation of removal of hexavalent chromium and divalent cobalt from aqueous solutions by organo-montmorillonite supported iron nanoparticles. *EUREKA: Physics and Engineering.* 2016. № 5. С. 81–88.
10. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод : монография. Москва : Химия, 1989. 448 с.
11. Марченко З. Фотометрическое определение элементов : монография. Москва : Мир, 1971. 547 с.
12. Brindley G.W., Brown G. Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification : monograph. London : Miner. Soc., 1980. 518 p.
13. Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) / под ред. В.А. Франк-Каменского. Ленинград : Недра, 1983. 359 с.
14. Уэллс А. Структурная неорганическая химия: монография. Москва: Мир, 1988. Т. 3. 564 с.
15. Zhdanyuk N., Chudinovich O. Research of structure and sorption properties of montmorillonite modified with hexadecylmethelammonium bromide. *Technology audit and production reserves.* 6/3(50). 2019. P. 19–23.
16. Коршунов А.В. Влияние дисперсности порошков железа на закономерности их окисления при нагревании в воздухе. *Журнал Известия Томского политехнического университета.* 2011. Т. 318, № 3. С. 5–11.
17. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов / перевод с англ. В. А. Алексева. 2-е изд. Москва : Металлургия, 1965. 428 с.
18. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные нано-частицы: методы получения, строение и свойства. *Успехи химии.* 2005. № 74(6). С. 539–574.
19. САНПин 4630-88. Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения. М. : Изд. Минздрава СССР, 1988. 67 с.

**Zhdanyuk N.V., Leshchenko P.V. STUDY OF THE STRUCTURE, THERMAL AND SORPTION PROPERTIES OF MONTMORILLONITE WITH A DEPOSITED LAYER OF NANO-SIZED ZERO-VALENT IRON**

*The structure of an iron-containing sorbent based on montmorillonite was investigated in the work using X-ray phase analysis (XRD). The results of XRD of the iron-containing composite confirmed the successful fixation of nanoscale zero-valent iron on the surface of montmorillonite. Scanning electron microscopy was used to study the surface morphology of montmorillonite, nanoscale zero-valent iron, and an iron-containing composite. As a result of research, it was confirmed that the particles of montmorillonite have the form of massive plates. For the Fe<sup>0</sup> sample, the formation of spherical particles is observed, which are connected to each other in chains. For the iron-containing composite based on montmorillonite, we observe a morphology similar to that of montmorillonite, but it should be noted that the particles of nano-sized zero-valent iron are fairly evenly distributed on the surface of montmorillonite. The thermal analysis of the iron-containing composite confirmed that no transformations occur in the sample up to 170 °C except for the release of physically bound water. This made it possible to determine the temperature intervals for drying the material. At a temperature above 950 °C, a structural transformation of montmorillonite occurs, which leads to the emergence of new phases: quartz, cordierite, enstatite, periclase, spinel. The obtained data allow us to state that the disposal of spent sorbents can be carried out using ceramic technology. In addition, these results of thermal analysis confirm that the oxidation of nano-sized zero-valent iron occurs at 320 °C, and the oxidation of iron in the iron-containing composite sample begins at 280 °C, which indirectly indicates a decrease in the size of its particles. Thus, it can be stated that the size of Fe<sup>0</sup> particles formed on the surface of montmorillonite is much smaller than Fe<sup>0</sup> particles obtained from pure solutions. These data confirm the results of XRD. Sorption studies confirmed that the synthesized iron-containing sorbent is capable of removing Cr(VI) and Co(II) ions from aqueous media, at an initial ion concentration of 1 mg/dm<sup>3</sup>, to values lower than the maximum permissible concentrations.*

**Key words:** X-ray phase analysis, thermal analysis, adsorption, scanning electron microscopy, chromium (VI), cobalt (II).

## ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.92/94

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/35>

**Бажай-Жежерун С.А.**

Національний університет харчових технологій

**Антонюк М.М.**

КЗВО «Рівненська медична академія»

**Башта А.О.**

Національний університет харчових технологій

### РОЗРОБЛЕННЯ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ М'ЯСО-РОСЛИННИХ КОНСЕРВІВ ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ

*Наразі в Україні спостерігається стійкий попит споживачів на готові до вживання продукти, зокрема м'ясні консерви, що зумовлює необхідність розширення їх асортименту та підвищення харчової цінності.*

*Включення рослинної сировини до складу м'ясних продуктів дозволяє збагатити їх цінними мікро- та макронутрієнтами: білковими речовинами, харчовими волокнами, вітамінами та фенольними сполуками, мінеральними речовинами тощо. Прогресивним напрямком у більшості розвинених країн світу є збагачення м'ясних продуктів зерновими та бобовими культурами, комплексом харчових волокон та окремими їх компонентами.*

*Авторами розроблено ряд рецептурних композицій м'ясо-рослинних консервів з біоактивованим нутом. Проведено органолептичну оцінку п'яти зразків м'ясо-рослинних консервів, виготовлених за різними рецептурами. Доведено, що оптимальним у рецептурі є вміст м'яса яловичини – 43–46%, біоактивованого нуту 32–36%. Вміст овочевої сировини – моркви та цибулі, у рецептурах дослідних зразків, варіювали у межах 2,5–3,5%.*

*Досліджено, що за фізико-хімічними показниками м'ясо-рослинні консерви з біоактивованим нутом повністю відповідають встановленим нормам. Результати визначення мікробіологічних показників свіжовиготовлених зразків продуктів та тих що зберігалися протягом 1 року, вказують на їх стерильність; ці продукти є безпечними з точки зору мікробіологічної чистоти. Розроблені консерви є продуктом оздоровчого спрямування. Розраховано, що за рахунок споживання 100 г м'ясо-рослинних консервів, збагачених біоактивованим нутом не лише поповнюється запас енергогенних нутрієнтів, але й більш як на 10% задовольняється добова потреба у незамінних компонентах раціону – вітамінах К, В1, В2, В6, РР; мінеральних сполуках – К, Р, Си, Fe.*

*Використання біоактивованого нуту та продуктів його перероблення у виробництві м'ясних консервів є перспективним напрямом підвищення їх харчової цінності.*

**Ключові слова:** м'ясо-рослинні консерви, м'ясо яловичини, біоактивований нут, показники якості, оздоровчі продукти.

**Постановка проблеми.** В наш час спостерігається підвищений попит споживачів на готові до вживання продукти, зокрема м'ясні консерви, які є джерелом білку, ряду вітамінів та мінеральних речовин, мають приємні смакові характеристики, доступні з економічної точки зору. Однак суттєвим недоліком цих м'ясопродуктів є незначна кількість чи повна відсутність харчових волокон,

необхідних компонентів раціону людини. Джерелами зазначених нутрієнтів є рослинна сировина, зокрема овочеві, зернові та зернобобові культури, побічні продукти їх перероблення тощо. Включення цієї порівняно недорогої сировини до рецептури м'ясних продуктів зменшує їх загальну вартість, а також надає їм оздоровчого спрямування.

Використання рослинної сировини при виробництві м'ясних продуктів дозволяє не тільки збагатити їх функціональними інгредієнтами, підвищити засвоюваність, а й отримати продукти, які відповідають основним фізіологічним нормам. У даний час існує необхідність у розробленні нових і вдосконаленні наявних рецептур та технологій, зокрема, м'ясо-рослинних консервів, які користуються великим попитом у населення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наразі у м'ясопереробній галузі харчової промисловості України особливу увагу привертає напрям розроблення м'ясо-рослинних продуктів оздоровчого спрямування як для широкого кола споживачів, так і для спеціального призначення: харчування дітей, матерів-годувальниць, спортсменів, військовослужбовців тощо.

Для збагачення м'ясних продуктів природними сорбентами доцільним є внесення у їх рецептури рослинних компонентів, які є джерелом природних полісахаридів. Встановлено, що поєднання традиційних видів м'яса, зокрема свинини, з рослинною сировиною – протеїном із насіння коноплі та соєвим ізолятом, у складі м'ясомісткої варено-копченої ковбаси, дає можливість виробляти повноцінні харчові продукти [1, с. 152].

Дослідження сприйняття здорової їжі та харчової неохочості показало, що існує потенціал для споживання м'ясних продуктів, зокрема варених ковбас, збагачених харчовими волокнами різних видів сировини. Дослідними зразками були ковбаси, до рецептури яких було включено нетрадиційні функціональні інгредієнти: харчові волокна кактусової груші та ананасу. Включення рослинних волокон позитивно корелювало з хорошим зовнішнім виглядом та смаком, також покращило текстуру виробів [2, с. 382].

Відмічено, що додавання рослинних компонентів, таких як овочева та фруктова сировина; рисові, пшеничні, вівсяні та інші види висівок у рецептуру ковбас, сосисок, котлет сприяє не лише поліпшенню біологічної цінності, але й зменшенню втрат у технологічному процесі, підвищенню водоутримуючої здатності фаршу, зміні рН і підвищенню стабільності емульсії та виходу у процесі варіння [3, с. 640].

При збагаченні бургерів з нежирною яловичиною інуліном, фруктоолігосахаридами, вівсяною та пшеничною клітковиною, науковці встановили, що використання розчинних і нерозчинних харчових волокон має різний вплив на якісні показники готових виробів. Нерозчинна клітковина збільшує вихід, текстуру і пружність нежирної яловичини,

розчинні полісахариди поліпшують сенсорні властивості продуктів [4, с. 527].

Досліджено доцільність включення квасолі, гарбуза та брюссельської капусти, як рослинних інгредієнтів, у рецептури низькокалорійних м'ясо-овочевих функціональних консервів на основі курятини [5, с. 133].

Відмічено позитивні результати комбінування м'ясної та бобової сировини, зокрема нуту при виробництві вареної ковбаси. Досліджено, що альбуміни нуту володіють гідрофільними та адсорбційними властивостями приблизно на рівні м'язової тканини, це сприяє підвищенню вологозв'язувальної та вологоутримувальної здатності в модельних фаршевих системах з використанням борошна нуту [6, с. 149].

Нут характеризується високим вмістом білка, вміст якого складає 20,1–32,4%, залежно від сортових особливостей. За показниками харчової цінності, нут перевершує майже усі зернобобові культури, зокрема, квасоллю, сочевицю і горох на 3–7%, поступаючись лише сої [7, с. 62].

Пророщування зерна, бобів та насіння використовують для пом'якшення ядра чи сім'ядолей, підвищення харчової цінності, зниження антиаліментарних речовин та поліпшення функціонального складу білків. Процес пророщування повинен бути нетривалим та проводитись за низьких температур, оскільки призводить до деградації β-глюканів, які суттєво впливають на зниження рівня холестерину та глюкози у крові, діяльність серцево-судинної системи, мають антибактеріальні, протипухлинні, радіопротекторні властивості. Так при проростанні зерна вівса протягом 72 год вміст β-глюканів знижується на 40–45% [8, с. 9].

Пророщування сприяє підвищенню біодоступності харчових сполук, шляхом часткового їх гідролізу, мінеральних речовин цільного зерна Fe і Zn, засвоювання яких ускладнене через наявність природних інгібіторів, а також зниженню активності наявних антиаліментарних речовин, таких як інгібітори ферментів, гемаглютининів тощо [9, с. 84].

У літературі відсутні дані щодо можливості виробництва м'ясо-рослинних консервів з використанням біологічно активованих бобів нуту.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є розроблення компонентного складу м'ясо-рослинних консервів оздоровчого призначення та дослідження їх якісних показників.

**Викладення основних результатів дослідження.** Нами визначено основні фізико-хімічні

властивості кількох вітчизняних сортів нуту: Триумф, Розанна і Пам'ять. Встановлено, що вміст білка у бобах нуту складає 22–25,7%, жиру – 3,3–3,6%, клітковини – 3,5–4,3%, залежно від сорту. Встановлено, що зерно нуту сорту Триумф містить найвищу кількість білка – 25,7%, найбільшу масу 1000 зерен – 368,8 г, характеризується високою якістю, зерно цього сорту використовували у подальших дослідженнях.

Біоактивування нуту здійснювали шляхом прощування сировини. Технологічний процес підготовки бобів нуту включав такі операції: інспектування сировини, миття, очищення, дезінфекцію 0,1–3,0% розчином H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, замочування повітряно-водяним способом протягом 12 год. за температури 20–22 °С, видалення води, промивання, пророщування протягом 48 год. за температури 20–22 °С, промивання та зберігання. Біоактивування за вказаних умов сприяє пом'якшенню бобів, а також

підвищенню вмісту вітамінів групи В, вітаміну С та токоферолів у бобах нуту, що пов'язано з активними процесами синтезу в сім'ядолях, які проростають. Синтез вітамінів відбувається за участю ферментів з використанням резервних речовин та компонентів гідролізу, зокрема цукрів.

Нами розроблено ряд рецептур м'ясо-рослинних консервів, з використанням яловичини першої категорії та біоактивованого нуту; складниками рецептури також є кунжут, цибуля, топлений жир, сіль, спеції.

Термічне оброблення консервів здійснювали методом стерилізації у скляній тарі у воді з водняним протитиском.

Фізико-хімічні і органолептичні показники якості м'ясо-рослинних консервів визначали за загальноприйнятими методиками та під час огляду і куштування зразка згідно з вимогами стандарту ДСТУ 4607:2006.

Таблиця 1

Розроблені рецептури м'ясо-рослинних консервів та характеристика їх харчової цінності і органолептичних показників

№	Рецептурні компоненти								Харчова цінність				Органолептичні показники
	Яловичина	Біоактивованний нут	Жир яловичий «Екстра»	Цибуля ріпчаста	Морква	Кунжут	Сіль	Спеції	Білки	Жири	Вуглеводи	Енергетична цінність, ккал	
1	46	32	12,0	3,0	3,0	3,5	1,2	0,3	15,93	14,74	13,84	251,74	Смак, властивий вареному нуту з м'ясом, добре відчутна наявність жиру, приємний запах, нут добре проварений, м'ясо рівномірно розподілене по усій масі продукту; колір властивий вареному нуту з м'ясом.
2	45	34	11	2,5	3,0	3,0	1,2	0,3	16,10	13,89	14,64	247,97	Смак приємний, нут добре проварений, розсипчастий, шматочки м'яса розміром сторін 12-14 мм розподілені по усій масі продукту, без сторонніх запаху і присмаку, гармонійна структура. Колір властивий вареному нуту з м'ясом.
3	44	35	10,5	3,0	3,0	3,0	1,2	0,3	16,22	13,56	15,0	246,8	Приємний смак вареного нуту з м'ясом, легкий аромат прянощів, нут добре проварений, розсипчастий, м'ясо рівномірно розподілене по усій масі продукту, гармонійна структура. Колір властивий вареному нуту з м'ясом.
4	43	36	11,0	3,0	2,5	3,0	1,2	0,3	16,13	13,79	15,44	250,27	Смак приємний, нут добре проварений, розсипчастий, м'ясо рівномірно розподілене по усій масі продукту, гармонійна структура. Колір властивий даному продукту.
5	42	37	11,5	2,5	3,5	2,5	1,2	0,3	16,06	14,29	15,84	256,21	Нут добре проварений, розсипчастий, м'ясо рівномірно розподілене по усій масі продукту, структура продукту дещо сухувата.



Проведено органолептичну оцінку п'яти зразків консервів, виготовлених за різними рецептурами. Залежно від способу споживання органолептичну оцінку м'ясних консервів проводять у гарячому або холодному вигляді. Усі зразки перевіряли та оцінювали у такому порядку: зовнішній вигляд, колір, запах, смак та консистенція.

На основі даних літературного огляду, та власних досліджень, встановлено що необхідний вміст спецій у рецептурі м'ясо-рослинних консервів складає 0,3%, зокрема, перець чорний мелений та мускатний горіх мелений по 0,01%, коріандр мелений – 0,28%. Кількість солі складала 1,2%. Вміст зазначених компонентів був не змінним в усіх зразках рецептур. Вміст овочевої сировини – моркви та цибулі, у рецептурах дослідних зразків, варіювали у межах 2,5–3,5%.

Готові м'ясо-рослинні консерви, отримані за рецептурами, які включали 43–46% яловичини та 32% біоактивованого нуту є в міру розсипчасті, мають приємний смак та запах, нут добре проварений, шматочки м'яса розподілені по усій масі продукту. При збільшенні вмісту нуту до 36% відмічено нормальну розсипчастість, структура консерви гармонійна. Збільшення масової частки нуту до 37% зумовлює сухість продукту, внаслідок збільшення вмісту харчових волокон сировини, гармонійність структури понижується, що не є доцільним. Оптимальний вміст біоактивованого нуту у консервах – 34–36%. Відмічено, що готовий продукт, який включає 10–11% яловичого жиру та необхідні інші компоненти є в міру розсипчастий, має приємний смак та запах, хорошу консистенцію. Збільшення масової частки жиру до 12% зумовлює погіршення органолептичних

показників консервів через занадто відчутну жирність продукту, що є не доцільним.

Досліджено фізико-хімічні показники м'ясо-рослинних консервів з біоактивованим нутом (табл. 2).

Отже, за фізико-хімічними показниками м'ясо-рослинні консерви з біоактивованим нутом повністю відповідають встановленим нормам.

За мікробіологічними показниками консерви м'ясо-рослинні повинні відповідати вимогам промислової стерильності. Нами було визначено основні показники мікробіологічної стерильності виготовлених продуктів.

Загальну кількість колонієутворювальних одиниць мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів (КУО МАНФАНМ) визначали у готових м'ясо-рослинних консервах з біоактивованим нутом, а також упродовж зберігання продукту протягом одного року. Результати досліджень мікробіологічних показників наведено у таблиці 3.

У результаті проведених мікробіологічних досліджень м'ясо-рослинних консервів з біоактивованим нутом, зокрема свіжовиготовлених зразків та тих, що зберігалися протягом одного року, мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних бактерій та спорових форм мікроорганізмів (бацили і клостридії) не було виявлено, що вказує на стерильність продукту. Протягом 1 року зберігання якості консервів не погіршилась, ці продукти є безпечними з точки зору мікробіологічної чистоти.

Розраховано харчову цінність консервів. Вміст основних енергогенних речовин м'ясо-рослинних консервів складає: білків – 15,93–16,22%, вуглеводів – 13,84–12% (з них 1,85% – харчові

Таблиця 2

**Фізико-хімічні показники м'ясо-рослинних консервів**

Назва показника	Вміст у консервах	
	Консерви м'ясо-рослинні. Каша з яловичиною (ДСТУ 4607:2007)	М'ясо-рослинні консерви з біоактивованим нутом
Масова частка жиру, %, не більша ніж	22,0	13,5–14,0
Масова частка білка, %, не менша ніж	5,0	16
Масова частка кухонної солі, %	1,0–1,7	1,2
Наявність сторонніх домішок	Не дозволено	Не виявлено

Таблиця 3

**Мікробіологічні показники м'ясо-рослинних консервів**

Показники, що визначалися	М'ясо-рослинні консерви з біоактивованим нутом	
	Свіжовиготовлені	Після зберігання 1 рік
МАНФАНМ, КУО/г, не більше	Не виявлено	Не виявлено
Кількість золотистого стафілококу, КУО/г	Не виявлено	Не виявлено
Кількість спороутворюючих мікроорганізмів, КУО/г	Не виявлено	Не виявлено

волокна), жирів – 13–16%, енергетична цінність – 252–255 ккал.

Встановлено, що ступінь забезпечення добової потреби в макро- та мікронутрієнтах, дорослого населення першої групи інтенсивності, за рахунок споживання 100 г консервів, збагачених біоактивованим нуту складає: білки – 27,22%, вуглеводи – 5,86%, жири – 27,94%, енергетична цінність – 14%; вітамін К – 11,6%, вітаміни групи В: В<sub>1</sub> – 12,6; В<sub>2</sub> – 13,05%, В<sub>6</sub> – 15,3%, РР – 12,7%; мінеральні речовини: К – 13,81%, Р – 10,9%, Fe – 10,64%, Cu – 22,9%. Розроблені м'ясо-рослинні консерви є оздоровчим харчовим продуктом.

**Висновки.** Розроблено ряд рецептур м'ясо-рослинних консервів, з використанням яловичини першої категорії та біоактивованого нуту; складниками рецептури також є кунжут, цибуля, топлений жир, сіль, спеції.

Досліджено основні фізико-хімічні, органолептичні та мікробіологічні показники якості м'ясо-рослинних консервів. Розроблені м'ясо-рослинні консерви є продуктом оздоровчого спрямування.

Використання біоактивованого нуту у технології м'ясо-рослинних консервів сприяє отриманню продуктів з прийнятними показниками якості.

#### Список літератури:

1. Божко Н. В., Тищенко В. І., Пасічний В. М., Ревенко Р. С. Білоквмісна сировина регіонального виробництва В технології м'ясомісткої варено-копченої ковбаси: *Технічні науки та технології*. 2019. 2(16). С. 145–153.
2. Juan Díaz-Vela, Alfonso Totosaus, Héctor B. Escalona-Buendía, M. Lourdes Pérez-Chabela Influence of the fiber from agro-industrial co-products as functional food ingredient on the acceptance, neophobia and sensory characteristics of cooked sausages: *J Food Sci Technol*. 2017. 54(2). P. 379–385.
3. Nitin Mehta, Ahlawat S. S., Sharma D.P., Dabur R. S. Novel trends in development of dietary fiber rich meat products – a critical review: *J Food Sci Technol*. 2015. 52(2). P. 633–647.
4. Bis-souza C.V., Henck J.M., Barretto A. Carla da Silva. Performance of low-fat beef burger with added soluble and insoluble dietary fibers *Food Sci. Technol*. 2018. 38(3). P. 522–529.
5. Chuyev S.A., Mezinova K.V., Ryadinskaya A.A., Ordina N.B., Koshchayev I.A., Zakharova D.A. Formulation development of original canned meat and vegetables for healthy nutrition: *BIO Web Conf*. 2021. 32. P. 128–136.
6. Холодова О. Вплив добавки нуту на формування реологічних властивостей фаршу для виготовлення ковбаси вареної: *Товари і ринки*. 2010. 1. С. 146–151.
7. Юдичева О.П. Використання нуту, вирощеного в Полтавській області, для переробки: *Харчова наука і технологія*. 2011. 1(14). С. 61–63.
8. Review A., Havrlentová M., Petruláková Z., Burgárová A., Gago F. Cereal  $\beta$ -glucans and their Significance for the Preparation of Functional Foods, *Czech J. Food Sci*. 2011. Vol. 29, 1, P. 1–14.
9. Delcour J., Hosney C. Principles of Cereal Science and technology, Geneve.2010.

#### **Bazhay-Zhezherun S.A., Antoniuk M.M., Bashta A.O. DEVELOPMENT OF THE COMPONENT COMPOSITION OF MEAT-VEGETABLE TINNED FOOD OF HEALTH IMPROVING USAGE AND RESEARCH OF THEIR QUALITATIVE INDICATORS**

*Now there is a steady demand in Ukraine for ready-to-eat products, including tinned meat, and it stimulates necessity of expanding their range and increasing the nutritional value.*

*Inclusion of vegetable raw materials in to meat products allows to enrich them with valuable micro- and macronutrients: protein, dietary fiber, vitamins and phenolic compounds, minerals and more. Progressive direction of most developed countries is the enrichment of meat products with cereals and legumes, dietary fiber complex and its individual components. The authors have developed a number of recipe compositions for tinned meat and vegetables with bioactivated chickpeas. An organoleptic evaluation of five samples of tinned meat and vegetables made according to different recipes was performed. It is proved that the optimal content in the recipe is beef – 43–45%, bioactivated chickpeas – 34–36%. The content of vegetable raw materials – carrots and onions, in the recipes of experimental samples, varied in the range of 2.5–3.5%.*

*The authors investigated that the physico-chemical parameters of tinned meat and vegetables with bioactivated chickpeas fully meet the established standards. The results of determination of the microbiological parameters of freshly prepared samples of products and those products stored for 6 months, indicate their sterility; these products are safe from the point of view of microbiological purity.*

*Developed tinned food is a product of healthful orientation. It is calculated that consumption of 100 g of tinned meat and vegetables enriched with bioactivated chickpeas not only replenishes the supply of energy nutrients, but also more than 10% satisfies the daily requirement for essential components of the diet – vitamins K, B1, B2, B6, PP; mineral compounds – K, P, Cu, Fe.*

*The usage of bioactivated chickpeas and products of its processing in production of tinned meat is a promising way to increase their nutritional value.*

**Key words:** *tinned meat and vegetables, beef, bioactivated chickpeas, indicators of quality, health improving products.*

УДК 663.222:005.336.6:543.92.06

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/36>**Каменева Н.В.**

Одеський національний технологічний університет

**Ткаченко О.Б.**

Одеський національний технологічний університет

**Манолі Т.А.**

Одеський національний технологічний університет

**Тараненко О.Г.**

Одеський національний технологічний університет

## ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТКА ВИН, ЯКІ НЕ МІСТЯТЬ СІРКИ, ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ СЕНСОРНОГО АНАЛІЗУ

У статті проаналізовано ситуацію щодо вин, які не містять сірки SO, на вітчизняному та міжнародному ринку, вивчено особливості вин, що не містять SO<sub>2</sub>, порівняно їх органолептичні показники з показниками вин, при виробництві, яких використовують SO<sub>2</sub>, визначено споживчі переваги. В умовах пандемії на винному ринку органічні, біодинамічні та натуральні вина продовжують продаватися більше та завойовують частину ринку. Вплив covid-19 на ринок винних продуктів, а саме на цьому сегменту ринку вина виявився значним, особливо наразі домінує Франція. Останніми роками виробники вина зосереджуються на вирощуванні органічного винограду, набуває популярності дослідження натурального вина, для якого потрібно використовувати лише дикі дріжджі, але все ж таки більшість із них додають сульфіти, щоб забезпечити більший термін зберігання та запобігти окисленню, що впливає на колір та смак вина. Коли вино дійде до споживача додані сульфіти гарантують, що пляшка буде свіжою за смаком, саме так як планував винороб. Але додані сульфіти іноді можуть викликати негативні побічні ефекти. В ході дослідження проведено відбір та моніторинг випробувачів для проведення сенсорного аналізу натуральних вин без сірки за допомогою методології сенсорного аналізу. Створена дегустаційна комісія для проведення сенсорного дослідження із застосуванням 100-бальної шкали згідно міжнародним вимогам. Результати дослідження сенсорного аналізу вин тристороннім методом підтвердили можливість ідентифікації вин без сульфітів. Доведене суттєві відмінності між зразками одного сорту в залежності від з їх походження. Зразки вин походження Україна, які не містили діоксид сірки, мали більш складні органолептичні характеристики за рахунок більш інтенсивного та складного аромату, вони отримали більш високі дегустаційні бали. Найбільший дегустаційний бал – 85 отримав зразок вина сорту Каберне – Совіньйон, походження Україна, без наявності діоксиду сірки, вино мало насичений рубіновий колір, більш інтенсивний букет з тонами пасльону, чорної смородини, перцю та гармонійний, повний смак. У порівнянні з вином Каберне Совіньйон походження Франція, у якому додавали при виробництві, діоксид сірки, випробувачі оцінили у 81 балів, вино мало менш інтенсивний аромат та смак. Крім того, Каберне-Совіньйон, виробництва України мало більш типові сортові характеристики. На основі отриманих результатів створено сенсорні профілі зразків вин з сортів винограду Каберне-Совіньйон та Мерло різних країн походження та надана їх порівняльна характеристика. Встановлено, що випробувачі та експерти надають перевагу винам українського походження, які не містять сірки.

**Ключові слова:** метод, вино, діоксид сірки, сенсорний профіль, Каберне Совіньйон, Мерло.

### Постановка проблеми

На сьогодні в Україні досліджень щодо натуральних вин без додавання сульфітів не проведено, оскільки недостатнє інституційне забезпечення у сфері виробництва вина; відсутня нормативно-правова база і складна процедура органічної сертифікації натуральних вин в Україні за нормами Європейського Союзу; відсутність

власних національних стандартів натуральних вин, відсутність фінансової підтримки виробництва вин зі сторони держави, недостатня поінформованість населення, виробників, органів державної влади та управління щодо органічного виробництва в регіоні, його переваги, недостатньо компетенції і досвіду суб'єктів господарювання щодо здійснення органічного виробництва

вин, відсутність кваліфікованих кадрів і системи їх підготовки в цьому напрямку.

Головною умовою для комерційного промислового виробництва є передбачуваність і стабільність результату, тому професійні винороби напрацювали технології, які передбачають додавання культурних дріжджів, діоксиду сірки, консервантів та стабілізаторів, фільтрацію, але щоб зупинити подальше окислення та стабілізувати напій використовують сірку. Важливого значення набуває питання у виноробній промисловості застосування діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), якій додають на різних технологічних стадіях: до сусла, як консервант, для запобігання росту бактерій, після бродіння та уповільнення процесу окислення, оскільки  $\text{SO}_2$  покращує смак та зберігає винні фруктові смаки та свіжість аромату [1].

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Винна індустрія еволюціонувала з плином часу, і зовсім нещодавно, охопивши безліч різних підгруп, однією з яких є ринок органічних вин. За останні роки зросла органічна винна промисловість. Цей стрімкий приріст інтересу призвів до еволюції декількох підгруп, включаючи біодинамічні та натуральні вина. В умовах розвитку ринкових відносин, значного розширення мережі вин без сірки досить незначний. В країнах Європи такі вина складають до 10%. В Україні такі вина відсутні але представлені лише в крафтовому виробництві в кількості до 2 %. Такі вина будуть відрізнятися від традиційних вин, оскільки винороб мінімально втрутився до його виготовлення.

У вині містяться два класи сульфідів: вільний і зв'язаний. Вільні сульфідні є тими, що можуть реагувати і, таким чином, проявляють як бактерицидні, так і антиоксидантні властивості. Зв'язані сульфідні – це ті, які реагували з іншими молекулами у винному середовищі. Сума вільних і зв'язаних сульфідів визначає загальну концентрацію сульфідів. Сульфідні мають декілька ключових ролей для вина. По-перше, це консервант, який захищає вино від окислення, поєднуючись з киснем. По-друге, антисептик, який дозволяють дезінфікувати бочки та обладнання, вбиваючи грибки та цвілі. Має протигрибкову дію, якій контролюють алкогольне бродіння, блокуючи розвиток бактерій та певних дріжджів. Ще одна важлива роль, це стабілізація та контроль, які допомагають просувати найефективніші дріжджі для алкогольного бродіння, блокуючи інші, прискорюють виділення дубильних і ароматичних речовин. Таким чином виноробство вин без сульфідів складне та досить затратне, але можливе. Суль-

фіти є природним побічним продуктом метаболізму дріжджів у ході виготовлення вина, тому все рівно містить невелику кількість сульфідів. У всіх винах без винятку міститься від 10 до 100 частин на мільйон  $\text{SO}_2$ , навіть якщо в процесі виноробства сірка не використовувалася.

У більшості країн існують суворі вказівки щодо максимально допустимих рівнів загальних сульфідів у вині. З точки зору виноробства, високі концентрації сульфідів можуть впливати на сенсорні властивості або характеристики вина. Крім того, занадто велика кількість сірки в суслі також затримує молочно-яблучне бродіння вина, особливо у винах з низьким рН [2]. З цих причин концентрація сульфідів у вині повинна ретельно контролюватися і регулюватися.

Останніми роками виробники вина зосереджуються на вирощуванні органічного винограду, набуває популярності дослідження натурального вина, для якого потрібно використовувати лише дикі дріжджі, але все ж таки більшість із них додають сульфідні, щоб забезпечити більший термін зберігання та запобігти окисленню, що впливає на колір та смак вина. Коли вино дійде до споживача додані сульфідні гарантують, що пляшка буде свіжою за смаком, саме так як планував винороб. Але додані сульфідні іноді можуть викликати негативні побічні ефекти, такі як закладення носа, свербіж у горлі, нежить, шкірний висип і т.п. У медичній літературі повідомляється, що менше 1% людей на планеті мають сильну алергічну реакцію на сульфідні.

В умовах пандемії на винному ринку органічні, біодинамічні та натуральні вина продовжують продаватися більше та завойовують частину ринку. Виробники чутливі до нових споживчих очікувань. Вплив covid-19 на ринок винних продуктів а саме сегменту ринку вина виявився значним. На ринку вин наразі домінує Франція, на Бордо та Бургундію доводиться близько 50% та 20% відповідно до торгової діяльності у 2019 році [3].

Серед інших основних гравців – Італія, Іспанія, Німеччина, США (для виробництва та споживання) та Китаю (переважно для споживання). Європейським законом регулюється органічне виробництво відповідно до конкретних систем сертифікації та контролю. Слід також відмітити, що оскільки ніякі хімічні маніпуляції з вином не допускаються, натуральне вино буде відрізнятися від регіону, сорту та від одного винтажу до іншого, тобто не має стабільної, гарантованої якості вина.

У 1970-х роках винороби почали практикувати органічне вирощування винограду завдяки гран-

там ЄС сільськогосподарського сектору. Сеппа Ніколаус (Sepp Moser)- виробник в південному регіоні Штирії Австрії, проводив дослідження своїх білих вин з винограду Совіньон Блан, 2012 року виробництва. Одне з цих вин було біодинамічне, а інше – традиційне, ці два види вина походили з його винограднику Опок, на смак вони дуже різні: перше вино (біодинамічне) надзвичайно живе, з концентрованими цитрусовими фруктами та з більш значним спектром ароматів; друге (традиційне) відчуває менше виражений смак та аромат. Різниця між цими винами лише 10 мг діоксиду сірки, що додається після другого розливу. Дослідник прагнув зменшити втручання та домішки, що використовуються у виробництві вина, майже до нуля. З 2000 року його виноробня перейшла на повністю біодинамічне виноробство, а компанія SeppMoser– одна з перших в Австрії отримала сертифікат “Demeter” [4].

Найперше вино, яке було позначене натуральним способом, – це вино, яке народилося поблизу Гайяка, муніципалітету Франції, у регіоні Окситанія, департамент Тарн в 2019 році з рук виноградаря Марін Лейс. Дослідницькою групою IWSR було здійснено дослідження на замовлення виставки Millésime Bio, присвяченої органічним винам, та її організатора SudVinBio. Очікується, що в 2023 році буде спожито 976 мільйонів пляшок органічного вина, що на 34% більше, ніж 729 мільйонів пляшок, спожитих у 2018 році. Таку популярність «органіки» можна пояснити глобальним трендом на екологічність, який набирає силу в усіх галузях. У 2018 році органічне вино становило 2,6% світового споживання вина, і до 2023 року воно, як очікується, зросте до 3,5%. У 2013 році воно становило лише 1,5%. У п'ятірці найбільших у світі країнах-споживачів вина – США, Франції, Італії, Німеччині та Китаї – ринок органічних вин у 2018 році коштував 3,3 млрд євро [5].

Прийнято вважати, що натуральне вино є прихлливим, воно може не добродити або перебродити, часто буває каламутне та з залишками газу. Через відсутність стабілізаторів консистенція може бути надто водянистою або, навпаки, надто щільною. Без консервантів довго вино не зберігається, хоча трапляються натуральні вина з довгою витримкою. Ще одна особливість цих вин, менша концентрація алкоголю.

Вино – складний розчин, що містить декілька компонентів із ймовірними антимікробними компонентами. Waite and Daeschel [6] у своїх дослідженнях визначав вплив чотирьох компонентів,

таких як низький рН (3.0–4.0), високий вміст органічної кислоти, вміст етанолу та загальний зміст діоксиду сірки (0–300 ppm). Доведено, що рівень і співвідношення базових компонентів у вині залежать від типу сировини, а саме сорту винограду, ступеню його стиглості та географічного регіону його культивування, способу переробки, технології виробництва, умов дозрівання та зберігання вина [7].

Наразі доступно дуже мало інформації щодо проведених досліджень сенсорного впливу процесів виноробства тихих вин, що не містять (SO<sub>2</sub>). Вивчення особливостей вин, що не містять SO<sub>2</sub>, порівняння їх органолептичних показників з показниками вин, при виробництві яких використовують SO<sub>2</sub>, а також визначення споживчих переваг є досить актуальною тематикою наукових досліджень.

#### Формулювання цілей статті

**Метою дослідження** є порівняльна характеристика вин, що не містять сірки, за допомогою методів сенсорного аналізу. Для досягнення мети було проаналізовано ситуацію щодо вин, які не містять сірки (SO<sub>2</sub>), на вітчизняному та міжнародному ринку, проведено відбір випробувачів для сенсорного дослідження та проведено порівняльну характеристику вин походження Франції та України за допомогою методів сенсорного аналізу.

#### Виклад основного матеріалу

Серед існуючих методів оцінки якості харчових продуктів головна роль належить органолептичному, або сенсорному методу дослідження, який дозволяє доступно, швидко і з достатньо високою точністю визначити рівень якості харчових продуктів. Наукові методи сенсорного аналізу широко використовуються в розвинутих країнах Європи, Японії, Америки у виробництві та обігу харчових продуктів.

Методологічною основою наших досліджень є методи сенсорного аналізу: розрізняльний метод «тристоронній» [8], метод баловою шкали згідно вимогам міжнародної організації OIV [9], та метод створення сенсорного профілю [10; 11]. Відбір експертів здійснений відповідно до ISO 8586:2012 [12]. Дослідження проводилося в 2019–2020 рр. в умовах навчально-наукової лабораторії сенсорного аналізу ОНАХТ (атестат про акредитацію № 201520 від 12.10.20).

Для сенсорного дослідження тристороннім методом проводився відбір випробувачів, було залучено 60 кандидатів. Для кандидатів було висунуто вимоги: вік не менше 21 року і не більше 60 років, рівень доходу на 1 особу в сім'ї

від 5 тис. грн, обов'язково серед усіх напоїв споживання сухого вина не менше 1–го разу на 2–3 тижня, мотивація розвитку своїх навичок в органолептичному аналізі, кандидати повинні бути здоровими та не мати хронічних захворювань, які можуть вплинути на органи чуття. Після відбору випробувачів проведено їх навчання на сприйняття кольору, запаху та смаку. Після проведення зовнішнього набору кандидатів сформована комісія з 36 випробувачів.

Для визначення порівняльної характеристики вин випробувачам пропонувалося визначити різницю між зразками А і В, де продукт А – це вино червоне сухе, авторське без сульфідів, виробництва Україна; продукт В – вино червоне сухе з сульфитами, виробництва Франція. Дослідження проведені за сортами Каберне Совіньйон та Мерло, окремо. Для порівняльної характеристики вин, віддали перевагу розповсюдженим європейським сортам винограду, які найбільш поширені серед споживачів.

Для проведення дослідження було підготовлено 54 порції продукту А та 54 порції продукту В, із них 18 зразків продукту А та 18 зразків продукту В визначені як еталони. Решта 36 зразків продукту А та 36 зразків продукту В кодовані унікальними випадковими тризначними цифрами. Зразки розділяли на 9 серій, кожна з яких включала чотири набори зразків. Перша порція в кожному наборі є еталонем, позначеним А-REF або В-REF, А-REF АВ, А-REF ВА, В-REF, В-REF ВА. Кожна з чотирьох тріад представлена 9 разів, щоб охопити 36 випробувачів в збалансованому та випадковому порядку. Згідно з методикою кожний випробувач отримав два зразка в бокалі, місткістю 30 мл, з помітками REF для визначення різ-

ниці аромату та смаку. Випробувачі ретельно знайомилися з ароматом та смаком однієї та другої проби й аналізував доти, поки не склалось чітке враження, що існує різниця в ароматі та смаку, і що цю різницю випробувач запам'ятав. За результатами цього дослідження вірно ідентифікували зразок без сірки, які співпадав з еталонем 28 із 36 випробувачів. Рівень  $\alpha$ -ризиків = 0,001, при  $n = 28$ , де  $n$  – вірні відповіді. Ризик від 1% до 0,1% (0,01–0,001) є підставою для заяви, що відмінності між об'єктами випробувань існують.

Для проведення порівняльної характеристики дослідних зразків за допомогою методу балових шкал складена дегустаційна комісія з 9 експертів для визначення сенсорної оцінки вин сортів Каберне Совіньйон та Мерло різних країн походження.

Зразки вин походження Україна, які не містили діоксид сірки, мали більш складні органолептичні характеристики за рахунок більш інтенсивного та складного аромату, вони отримали більш високі дегустаційні бали. Найбільший дегустаційний бал – 85 отримав зразок вина сорту Каберне – Совіньйон, походження Україна, вино мало насичений рубіновий колір з фіолетовим відтінком, більш інтенсивний букет з тонами пасльону, чорної смородини, перцю та гармонійний, повний смак (табл. 1).

У порівнянні зі зразком вина Каберне Совіньйон походження Франція, у якому додавали при виробництві, діоксид сірки, випробувачі оцінили у 81 балів, тобто нижче на 4 балів, вино мало менш інтенсивний аромат та смак. Крім того, зразок № 1 Каберне-Совіньйон, виробництва України мало більш типові сортові характеристики, ніж зразок № 2 (табл. 1).

Таблиця 1

**Органолептичні показники вин з сортів Каберне Совіньйон та Мерло виробництва Україна і Франція**

№ зразка	Назва зразка	Наявність діоксиду сірки	Характеристика вина	Бали
1	Каберне-Совіньйон, 2018 р., країна походження Україна, авторське виробництво	Без наявності	Колір глибокий, рубіновий з фіолетовим відтінком; інтенсивний букет з тонами пасльону, чорної смородини та повний, гармонійний смак з тривалим приємним післясмаком, типовий сорту	85
2	Каберне-Совіньйон, 2018 р., країна походження Франція, виробник Saint-Marc	Присутня	Колір червоний з фіолетовим відтінком, букет чистий, сливовий з легким відтінком квітів, інтенсивність аромату не висока, смак гармонійний, з нетривалим післясмаком.	81
3	Мерло 2018 р., країна походження Україна, авторське виробництво	Без наявності	Колір гранатовий, букет чистий з яскраво вираженими тонами ожини, сливи, фіалки, смак повний гармонійний з тривалим сливовим післясмаком.	82
4	Мерло 2018 р., країна походження Франція, виробник Saint-Marc	Присутня	Колір червоний, букет чистий з тонами сливи, ожини, вишні, смак легкий, вино з коротким післясмаком.	80

Зразки вин сорту Мерло обох країн мали типові характеристики, насичений гранатовий колір, чистий букет з яскраво вираженими тонами ожини, сливи, фіалки, смак повний гармонічний. Зразок № 4, вино сорту Мерло, походження Франція, з додаванням діоксиду сірки отримав найменший дегустаційний бал – 80 балів, воно мало червоний колір, слабку інтенсивність букету та смаку, а також короткий післясмак.

Результати цього експерименту довели суттєву різницю за органолептичними показниками

між зразками одного сорту винограду різних країн походження та показали більш складні та якісні органолептичні показники у зразків, при виробництві яких не застосовували діоксид сірки. Також слід відмітити, що експерти, як й споживачі надали перевагу зразку № 3 сорту Каберне Совіньйон виробництва Україна, який був без наявності діоксиду сірки.

На основі отриманих результатів створено сенсорні профілі зразків вин з сортів винограду Каберне-Совіньйон та Мерло різних країн походження (рис. 1–2).

Представлені данні органолептичної оцінки зразків вин Каберне Совіньйон, які досліджували, свідчить про те, що найбільш високими якісними показниками відрізнявся зразок Каберне Совіньйон виробництва Україна, без наявності сірки, якій мав насичений фруктовий аромат з вираженим ароматом вишні, пасльону, який у зразку Франції відсутній, а також аромат спецій, інтенсивність та кислотність більш виразні, у порівнянні зі зразком Каберне Совіньйон виробництва Франція. Спеції такі як імбир, перець більш домінують у зразку з України. Сторонніх ароматів та смаків у дослідних зразках не відмічено.

Дослідні зразки сорту Мерло відрізнялись не суттєво, колір у зразків був майже однаковим. В ароматі та смаку зразків, що досліджувались відмічені домінуючі дескриптори, як вишня, слива, смородина. Більш виразний аромат вишні та сливи спостерігався у зразка Мерло, походження України. Інтенсивність аромату, кислотність та типовість майже не відрізняються. У обох зразків в смаку присутня приємний аромат вишні, смородини майже однакової інтенсивністю, яка характерна для сорту Мерло.

Таким чином, порівняльна сенсорна оцінка вин, з додаванням та без діоксиду сірки різних країн походження, а саме Україна та Франція, показала, що по-перше є суттєва різниця за інтенсивністю та складністю сенсорних профілів зразків вин з додаванням сірки та без, в бік переваги вин натуральних, тобто без наявності сірки. За країнами походження різниця між дослідними

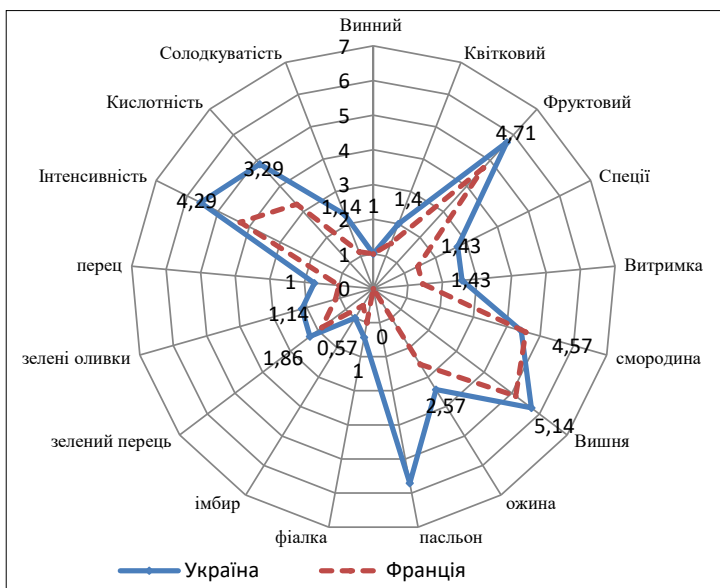


Рис. 1. Смакоароматичний сенсорний профіль вина Каберне-Совіньйон

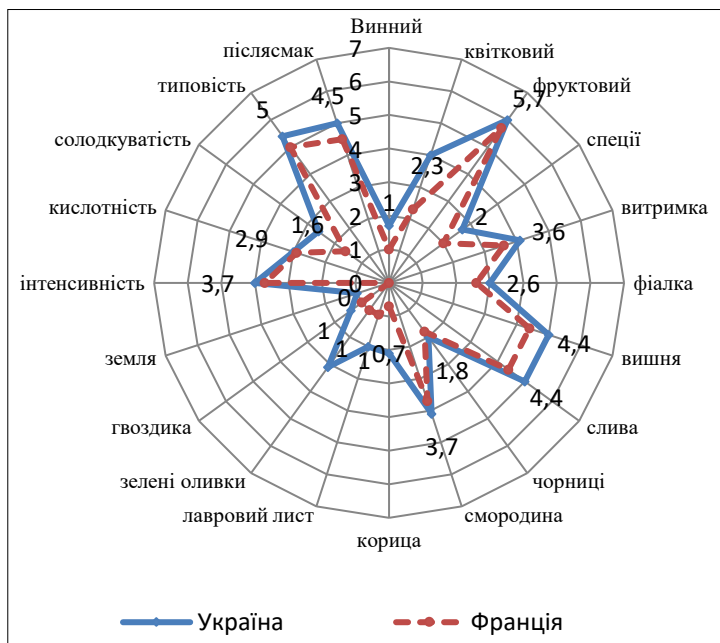


Рис. 2. Смакоароматичний сенсорний профіль вина Мерло

зразками була менш суттєва. Органолептична оцінка за допомогою методу бальної шкали також довела перевагу дослідних зразків, походження України, де при виробництві не застосовували сірку: зразок № 1 Каберне Совіньон отримав найбільшу дегустаційну оцінку – 85 балів, на другому місці, зразок № 3 Мерло з оцінкою 82 бали. Крім того слід додати, що за перевагами обраних споживачами та експертами також зразок № 1 вина Каберне-Совіньон, українського походження, без наявності діоксиду сірки.

**Висновки.** Проведено відбір та моніторинг випробувачів для проведення сенсорного аналізу натуральних вин без сірки за допомо-

гою методології сенсорного аналізу. Створена дегустаційна комісія для проведення сенсорного дослідження із застосуванням 100–бальної шкали. Результати дослідження методики сенсорного аналізу вин тристороннім методом підтвердили можливість ідентифікації вин без сульфітів. Доведене суттєві відмінності між зразками одного сорту в залежності від їх походження. Зразки вин походження Україна, мали більш високі дегустаційні бали, вони характеризувалися більш складним букетом та повним гармонійним смаком. Встановлено, що випробувачі та експерти надають перевагу винам українського походження, які не містять сірки.

#### Список літератури:

1. Reynaud E. *Knowing and Making Wine*. John Wiley & Sons; New York, NY, USA: 1984. PP. 135–136.
2. Горюшкіна Т. Б., Дзядевич С. В. *Виноградні вина. Хімічний склад та методи визначення*. 2008. Т. 1. № 2. С. 24–38.
3. Лежерон І. *Натуральне вино*. Львів: видавництво Старого Лева, 2019. 223 с.
4. Munos-Gonzalez, C. Beyond the characterization of wine aroma compounds: looking for analytical approaches in trying to understand aroma perception during wine consumption. *Analytical and Bio analytical Chemistry*, 2011. Vol. 401. Issue 5. P. 1501–1516.
5. Stockley, C. Sulfur dioxide and the wine consumer. *Aust. N. Z. Grape grow. Winemaker* 2005, 501, 73–76.
6. Waite J.G, Daeschel M.A. Contribution of Wine Components to Inactivation of food – borne pathogens. *Journal of Food Science*, 2007. 2007 Sep; 72 (7). PP. 86–91.
7. Jackson, R. *Wine Tasting. A Professional Hand book*. Academic Press. 2009. 512 p.
8. ДСТУ ISO 4120:2004. Дослідження сенсорне. Методологія. Тристоронній метод випробування. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 8 с.
9. Compendium of International Method of Wine and Must Analysis ; O.I.V. : Paris. France, 2006. Vol. 2.
10. ДСТУ ISO 11035:2005. Дослідження сенсорне. Ідентифікація та вибирання дескрипторів для створення сенсорного спектра за багатобічного підходу. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 28 с.
11. ISO 8586:2015 Sensory analysis. General guidelines for the selection, training and monitoring of selected assessors and expert sensory assessors, 2015. 28 p.
12. Основи сенсорного аналізу харчових продуктів : навч. посіб. / О.Б. Ткаченко та ін. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 304 с.

**Kameneva N.V., Tkachenko O.B., Manoli T.A., Taranenko O.G.**

#### **COMPARATIVE CHARACTERIZATION OF WINES THAT DO NOT CONTAIN SULFUR, BY MEANS OF SENSORY ANALYSIS METHODS**

*This article analyzes the situation of “SO<sub>2</sub>-free” wines on the domestic and international market, analyzes peculiarities of SO<sub>2</sub>-free wines, comparing their organoleptic characteristics with indicators of wines produced without SO<sub>2</sub>, evaluates their saleability. Under conditions of pandemics in the wine market, organic, biodynamic and natural wines continue to sell more and win part of the market. The influence of covid-19 on the market of wine products, namely on this segment of the wine market was significant, especially in France. In recent years, wine producers are focusing on the cultivation of organic grapes, gaining popularity research of natural wine, which requires using only wild grape varieties, But still most of them add sulfites to ensure longer shelf life and to prevent oxidation, which affects the color and flavor of the wine. When the wine reaches the consumer added sulfites guarantee that the beach will be fresh for flavor, just as the winemaker planned. But the added sulfites can sometimes cause adverse side effects. In the course of the research the selection and monitoring of samplers for sensory analysis of natural wines without sulfur was carried out with the help of the methodology of sensory analysis. Established a tasting panel for the sensory examination using a 100-point scale in accordance with international requirements. The results of the sensory analysis of wines by tripartite method confirmed the possibility of identification of wines without sulfites. The essential differences between the samples of one variety depending on their origin were given. Wines from Ukraine, which did not contain sparkling dioxide, had more complex organoleptic characteristics due to more intense and complex flavor,*



*they received more high tasting scores. The highest tasting score – 85 won the Cabernet Sauvignon, Ukrainian origin, without the presence of dioxide, the wine has little ruby color, more intense bouquet with tones of peasants, black currant, pepper and harmony, full flavor. Compared to the French Cabernet Sauvignon, which was added during the production, the wine testers rated at 81 points, the wine has a little less intense flavor and aroma. In addition, Cabernet Sauvignon, produced in Ukraine, has few more typical varietal characteristics. On the basis of the obtained results, sensory profiles of Cabernet-Sauvignon and Merlot grape varieties of different countries of origin were created and their comparative characteristics were given. It is established that wine tasters and experts give preference to wines of Ukrainian origin, which do not contain sourness.*

**Key words:** *method, wine, sulfur dioxide, sensory profile, Cabernet Sauvignon, Merlot.*

**Кирпіченкова О.М.**

Національний університет харчових технологій

**Литвинець Л.Ф.**

Національний університет харчових технологій

## СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ВИКОРИСТАННЯ ПЛОДІВ БУЗИНИ ЧОРНОЇ У ВИРОБНИЦТВІ РЕСТОРАННОЇ ПРОДУКЦІЇ

*У статті досліджується напрями використання плодів бузини сушеної в технології ресторанної продукції.*

*Гостра конкуренція між ресторанами заохочує до нових поглядів на використання відомих продуктів, пошуку нових способів їх переробки для кращого розкриття їх властивостей і створення оригінального асортименту кулінарної продукції у ресторанах. Крім того, на сьогоднішній день люди стали більш свідомо відноситись до того, що вони споживають. Тож актуальною є розробка страв з підвищеною харчовою цінністю, надання оздоровчих або функціональних властивостей існуючим стравам, і, таким чином, розширення асортименту корисних страв і підвищення конкурентоспроможності закладу. Наразі дуже популярними сировинними інгредієнтами в ресторанній галузі стають продукти, що всім відомі, але їх використання не набуло широкого загалу. Наприклад, плоди бузини чорної. Плоди бузини можна використовувати в свіжому вигляді, консервувати сорбіновою кислотою, переробляти на пюре, висушувати. В Україні немає крупних промислових виробників, що здатні виробляти і постачати продукт стабільної якості. В основному переробляють дикорослу сировину невеликі підприємства, що не зменшує корисних властивостей продукту. Страви і напої з бузини здавна присутні в українській кухні, але не набули великої популярності. Отже сучасні дослідники мають можливість відродити старовинні рецепти та розробити нові, оскільки плоди бузини багаті на різні біологічно-активні речовини: аскорбінову та яблучну кислоти, рутин, каротин, самбуцин, пектини, антоціанові барвники, поліфеноли.*

*Плоди бузини зберігати в сухому вигляді зручно, але використання їх у приготуванні страв викликає певні труднощі. Тому була розроблена технологія приготування пюре-напівфабрикату бузинового, яке можна використовувати в технології різних груп кулінарної продукції, і рецептури соусів та десерту з його додаванням.*

**Ключові слова:** *плоди бузини чорної, Sambucus nigra L., ресторан, оздоровчі страви.*

**Постановка проблеми.** Сучасний ритм життя створює багато задач, що викликають стресові ситуації, тож сучасна людина, щоб ефективно функціонувати проявляє більш уважне ставлення до свого харчування, як запоруки здоров'я. Крім того, для багатьох людей, зокрема туристів, їжа є не тільки енергетичним матеріалом, а і джерелом отримання інформації про країну, місто, заклад в якому вони перебувають, емоційною складовою відпочинку. Тому потрібно подбати про те, щоб у меню був широкий асортимент страв, що мають оригінальний вигляд і мають позитивний вплив на здоров'я людини.

Наразі дуже популярними сировинними інгредієнтами в ресторанній галузі стають рослинні продукти, що всім відомі, але їх використання не набуло широкого загалу. Такі продукти використовують щоб створювати страви оздоровчого направлення, також безглютеніві, вегетаріанські страви.

Наприклад, до такої сировини відносяться плоди бузини чорної.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Переробка ягід бузини викликає цікавість дослідників, існують дослідження по визначенню технологічних властивостей свіжих ягід бузини, використання їх для отримання соку [1; 2] і збагачення його біологічно активними речовинами. Інші дослідники визначали як спосіб переробки ягід впливає на вміст фенольних речовин у кінцевому продукті [3]. Для цього свіжі ягоди попередньо бланшували і перетирали на пюре, або заморожували. Проте не знайдено інформації про використання сушених ягід бузини чорної, їх технологічних властивостей, тож необхідно проводити дослідження в цьому напрямі.

**Формулювання цілей статті.** Наші дослідження присвячені переробці сухих плодів бузини чорної для подальшого використання

у технологіях різних груп ресторанної продукції, зокрема соусів та десертів, та розроблення технологій нових страв з продуктами переробки сухих ягід бузини. В Україні немає крупних промислових виробників, що здатні виробляти і постачати плоди бузини стабільної якості у великих об'ємах, тому що ця рослина тільки починає здобувати свою широку популярність, а, відповідно, більше використання в кулінарії. Проте її корисні властивості цінують в інших європейських країнах та Північній Америці, тому невеликі підприємства, що переробляють дикорослу сировину, в основному направляють її на експорт за кордон [4].

**Виклад основного матеріалу.** Бузина (*Sambucus nigra* L.) – листопадний чагарник, що характеризується великими білими та запашними суцвіттями та блискучими фіолетово-чорними ягодами. Він поширений в Європі від Середземноморських регіонів до Південної Скандинавії. Його культивують у всьому світі заради ягід, які використовуються як в кулінарії, так і в кулінарії медичні цілі [5].

Сучасні дослідження показують, що препарати на основі чорної бузини допомагають у лікуванні гіперліпідемії, знижують ризик серцево-судинних захворювань, допомагають при застуді та грипі, підвищують імунітет, вирішують багато інших проблем зі здоров'ям.

Плоди бузини чорної містять ряд корисних речовин: аскорбінову та яблучну кислоти, рутин, каротин, самбуцин, цукри (глюкоза, фруктоза), дубільні речовини, пектини, антоціанові барвники, поліфеноли.

Використання плодів бузини досить широке: у виноробстві та алкогольній промисловості для приготування портвейну, лікеру і, навіть, шампанського; приготування натуральних пурпурних та червоних барвників, які використовуються в харчовій та текстильній промисловості.

В старі часи сільські мешканці, коли наступала весна, зривали верхівки молодих пагонів бузини, очищали їх так, щоб залишилася тільки ніжна серцевина, і вживали їх в якості зелені. Зрілі сушені плоди додаються при засолюванні деяких овочів та при виготовленні малосольних огірків. Особливо добре ягоди бузини поєднуються з яблуками в напоях, начинках для пирогів [6].

Тож страви і напої з бузини здавна присутні в українській кухні, але наразі не популярні. Отже сучасні шефи мають можливість відродити старовинні рецепти та розробити нові.

При проведенні досліджень використовували плоди бузини чорної, що зібрані в Сумській

області та висушені. В таблиці 1 наведені фізико-хімічні характеристики сухих плодів бузини чорної.

Таблиця 1

**Хімічний склад сухих плодів бузини чорної**

Найменування показника	Значення
Масова частка сухих речовин, %	93,0 ± 0,5
Вміст водорозчинного пектину, г/100 г	3,2 ± 0,1
Вміст клітковини, г/100 г	6,3 ± 0,1
Вміст протопектину, г/100 г	4,2 ± 0,1
Вміст цукрів, г/100 г	43 ± 0,5

Для внесення у солодкі страви сухі плоди бузини доцільно переробляти на пюре [7]. Технологічна схема приготування пюре-напівфабрикату бузинового наведена на рис. 1. Плоди бузини сушеної замочували водою у співвідношенні 1:1,5 та витримували 15 хвилин, потім нагрівали до кипіння та додавали 1% лимонної кислоти та проварювали 15–20 хвилин.

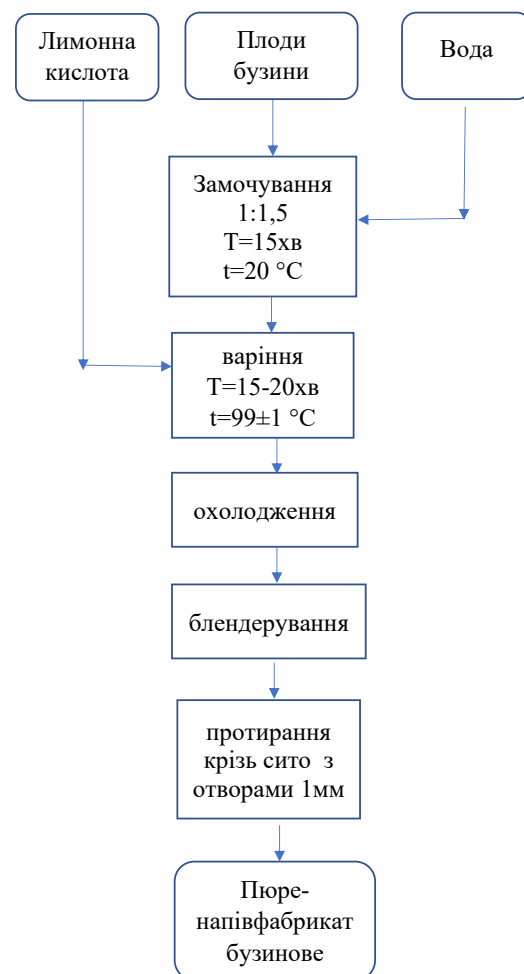


Рис. 1. Схема приготування пюре-напівфабрикату бузинового

При цьому шкірочка плодів частково розм'якшувалася за рахунок переходу протопектину в пектин під впливом кислоти. Суміш охолоджували, блендерували 2-3 хвилини і протирали крізь сито з отворами 1 мм. Отримане пюре-напівфабрикат має наступні фізико-хімічні показники: масова частка сухих речовин  $20 \pm 0,5\%$ , рН  $3,4 \pm 0,1$ .

Пюре бузинове містить пектини, органічні кислоти, поліфеноли, вітаміни: В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, РР, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>9</sub>, мінерали: кальцій, калій, залізо, магній, цинк, мідь та селен. Бузину використовують для лікування багатьох захворювань, таких як цукровий діабет, коліки, діарея, лихоманка, кашель, застуда, бронхіт, грип, ревматизм, набряки кінцівок, опіки, запалені слизові оболонки [5].

Отримане пюре-напівфабрикат бузинове використовували в технології яблучних десертів та соусів у кількості 5-15% замість яблук. Дане дозування пюре дає можливість отримати страви відповідної якості. Більше дозування надає стравам специфічного смаку та темного забарвлення.

Пюре-напівфабрикат бузинове досліджували на кількість мезофільних аеробних і факультативно – анаеробних мікроорганізмів (КМАФАнМ) в 1 г продукту, наявність бактерій групи кишкової палички в 0,01 г продукту, на кількість плісневих грибів і дріжджів в 1 г продукту. Впродовж всього періоду зберігання пюре-напівфабрикату бузинового, не були виявлені бактерії групи кишкової палички, плісневі гриби та дріжджі, кількість КМАФАнМ знаходилась в межах норми.

При проведенні досліджень було розроблено соуси яблучно-бузиновий, сметанно-бузиновий, самбук яблучно-бузиновий. В таблиці 2 наведені

рецептури страв, розроблених на основі класичних рецептур [8; 9].

Пюре-напівфабрикат бузинове додавали у кількості 5–15% до виходу страви. Визначено, що оптимальне дозування пюре-напівфабрикату бузинового в соус яблучно-бузиновий складає 5%, соус сметанно-бузиновий – 10%, самбук яблучно-бузиновий – 15%.

*Технологія приготування соусу яблучно-бузинового.* Яблука з шкіркою (без серцевини) нарізають скибочками, заливають гарячою водою і варять 6-8 хвилин у закритому посуді до готовності. Потім протирають, додають відвар, пюре-напівфабрикат бузинове, цукор, лимонну кислоту, доводять до кипіння, вводять попередньо розведений охолодженим відваром крохмаль, дають ще раз закипіти. В готовий соус кладуть корицю.

*Технологія приготування соусу сметанно-бузинового.* Для соусу борошно пасерують без масла, щоб воно не змінило кольору, охолоджують, додають масло, перемішують. Сметану доводять до кипіння, додають підготовлену борошняну пасеровку з маслом, пюре-напівфабрикат бузинове, перемішують, доводять до кипіння, заправляють сіллю, перцем, варять 3–5 хвилин, проціджують і знову доводять до кипіння.

В таблиці 3 наведено характеристику показників якості розроблених страв.

*Технологія приготування самбуку яблучно-бузинового.* Яблука (без насінневого гнізда), кладуть на лист, наливають невелику кількість води і запікають у жаровій шафі. Потім їх охолоджують і протирають. В утворене пюре додають цукор, пюре-напівфабрикат бузинове, яєчний білок

Таблиця 2

**Рецептури розроблених страв**

№	Найменування сировини	Соус яблучно-бузиновий		Соус сметанно-бузиновий		Самбук яблучно-бузиновий	
		Витрати сировини на 100 г страви					
		Брутто	Нетто	Брутто	Нетто	Брутто	Нетто
1	Яблука свіжі	24	20	–	–	69,5	60
2	Пюре-напівфабрикат бузинове	5	5	10	10	15	15
3	Цукор	12,5	12,5	3	3	20	20
4	Крохмаль картопляний	30	30	–	–	–	–
5	Кориця	0,1	0,1	–	–	–	–
6	Кислота лимонна	0,1	0,1	–	–	–	–
7	Вода	70	70	–	–	10	10
8	Сметана	–	–	90	90	–	–
9	Масло вершкове	–	–	5	5	–	–
10	Борошно пшеничне	–	–	5	5	–	–
11	Яйця (білок)	–	–	–	–	1/6 шт.	4,8
12	Желатин	–	–	–	–	1,5	1,5
	Вихід	–	100	–	100	–	100

## Характеристика показників якості розроблених страв

Показник	Характеристика		
	Соус яблучно-бузиновий	Соус сметанно-бузиновий	Самбук яблучно-бузиновий
Зовнішній вигляд	без грудочок крохмалю і плівки на поверхні	колір соусу – бузковий, соус злегка обволакає ложку, стікаючи з неї тоненькою цівкою	маса пухка, колір світло-бузковий, без наявності грудочок
Запах, смак	солодкий з ароматом яблук і бузини	кисло-солодкий, у міру солоний. Не допускається смак сирого, підгорілого борошна, плівка на поверхні	солодкий з кислуватим присмаком і запахом яблучного та бузинового пюре
Консистенція	однорідна, в'язка	однорідна, в'язка, еластична, напіврідка	дрібнопориста, пружна, однорідна
Масова частка сухих речовин, %	15,0	12,0	25,0

і збивають на холоді до утворення пухкої маси. Підготовлений (попередньо замочений) желатин вливають тоненькою цівкою у збиту масу, безпосередньо і швидко помішуючи вінчиком. Розливають у форми і охолоджують.

Соус яблучно-бузиновий подають до страв з круп і десертів. Зберігають до 4 годин на водяній бані. Соус сметанно-бузиновий використовують для приготування запечених страв з овочів. Можна страву полити або подати соус у соуснику. Зберігають до 2 годин на водяній бані. Температура подавання соусів 60–65 °С. Самбук яблучно-бузиновий подають у креманках або вазочках, десертних тарілках, поливають ягідним сиропом. Зберігають до 2 годин. Температура подавання самбуку 7–10 °С.

Використання пюре-напівфабрикату бузинового можливо також в технології інших солодких страв, страв з сиру кисломолочного, борошняних страв для надання їм оригінального кольору та смакових нюансів, збагачення корисними речовинами.

**Висновки.** Визначено параметри технологічного процесу отримання пюре-напівфабрикату бузинового з сухих плодів бузини чорної, розроблено рецептури і технологію приготування соусу яблучно-бузинового, соусу сметанно-бузинового і самбуку яблучно-бузинового з оригінальними органолептичними показниками та оздоровчими властивостями, завдяки біологічно-активним речовинам, що вносяться з пюре. Технологічне значення приготування пюре-напівфабрикату бузинового полягає в тому, що його можна приготувати заздалегідь, тобто прискорити процес приготування страви, коли її вже чекає гість, також його можна використовувати в технології різних видів кулінарної продукції.

Таким чином, використання дикорослих рослин, зокрема бузини чорної дає можливість розширення асортименту ресторанної продукції оригінальними стравами, які до того ж мають позитивний вплив на здоров'я людини. Це дасть можливість ресторану вирізнятися серед конкурентів і здобувати прихильність нових гостей.

## Список літератури:

1. Хомич Г. П., Положишнікова Л. О. Зміна вмісту біологічно активних речовин бузини чорної при виробництві соків. Восточно-европейский журнал передовых технологий. Харьков, НИИ ЧП Технологический центр, 2015. № 5/10 (77). С. 62–67. doi:10.15587/1729-4061.2015.51064.
2. Хомич Г. П., Капрельянц Л. В., Ткач Н. Дослідження технологічних властивостей ягід бузини чорної. Тематичний збірник наукових праць “Обладнання та технології харчових виробництв”. Випуск 28. 2012. URL: <http://dspace.puet.edu.ua/handle/123456789/4192>
3. Басюк Т. М., Наконечна Ю. Г. Удосконалення технології переробки бузини чорної при виробництві харчових продуктів. URL: <http://dspace.puet.edu.ua/handle/123456789/10422>
4. В огороде бузина: перспективы выращивания. URL: <https://latifundist.com/spetsproekt/747-v-ogorode-buzina-perspektivy-vyrashchivaniya> (дата звернення 12.05.2022).
5. Enescu, C. M., Houston Durrant, T., Caudullo, G. Sambucus nigra in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, 2016. pp. e013c0f+
6. Пересада К., Кирпиченкова О. М. Використання ягід бузини чорної в кулінарії. Матеріали 88 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішення проблем харчування людства у XXI столітті», Квітень–Травень 2022 р. К. : НУХТ, 2022 р. Ч. 3. С. 182.

7. Силенко П.О., Кирпиченкова О. М., Стахурська Л. В. Використання плодів бузини чорної у виробництві солодких страв. Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції, «Інноваційні технології в готельно-ресторанному бізнесі», присвяченої до 70-річчя з дня народження професора В.Ф. Доценка, 17 травня 2022 р. К. : НУХТ, 2022 р. Ст. 64.

8. Збірник рецептур національних страв та кулінарних виробів, правових, нормативно-правових та інших актів для закладів ресторанного господарства. 3-тє вид., переробл. Та доповн. / автор-розробник і укладач О.В. Шалимінов. К. : Арії, 2016. 992 с.

9. Мелько М. В., Ступін О. С. Збірник технологічної документації. Львів : СПОЛОМ, 2016. 226 с.

#### **Kyrpichenkova O.M., Litvinets L.F. MODERN DIRECTIONS OF USE OF BLACK ELDER FRUIT IN THE MANUFACTURE OF RESTAURANT PRODUCTS**

*The article investigates the directions of use of dried elderberries in the technology of restaurant products.*

*Fierce competition between restaurants encourages new views on the use of well-known products, finding new ways to process them to better disclose their properties and create an original range of culinary products in restaurants. In addition, today people have become more aware of what they consume. Therefore, it is important to develop dishes with high nutritional value, to provide health or functional properties to existing dishes, and, thus, to expand the range of healthy dishes and increase the competitiveness of the institution. Currently, very popular raw ingredients in the restaurant industry are products that are known to all, but their use has not become widespread. For example, the fruits of black elderberry. Elderberries can be used fresh, canned with sorbic acid, processed into puree, dried. There are no large industrial producers in Ukraine capable of producing and supplying a product of stable quality. Small enterprises mainly process wild raw materials, which does not reduce the useful properties of the product. Elderberry dishes and drinks have long been present in Ukrainian cuisine, but have not gained much popularity. Thus, modern researchers have the opportunity to revive ancient recipes and develop new ones, as elderberries are rich in various biologically active substances: ascorbic and malic acids, rutin, carotene, sambucinin, pectins, anthocyanin dyes, polyphenols.*

*Elderberries are convenient to store dry, but their use in cooking causes some difficulties. Therefore, the technology of preparation of elderberry puree-semi-finished product, which can be used in the technology of different groups of culinary products, and recipes for sauces and desserts with its addition was developed.*

**Key words:** black elderberry, *Sambucus nigra* L., restaurant, health dishes.

# ТРАНСПОРТ

УДК 656.11:625.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/38>**Кисельов В.Б.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Лановий О.Т.**

Національний транспортний університет

**Кошарний О.М.**

Національний транспортний університет

## МАКРОЕКОНОМІЧНИЙ ВПЛИВ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ

*Автомобільні дороги загального користування – це позаміські автомобільні дороги державної форми власності, що забезпечують внутрішні та міжнародні перевезення пасажирів і вантажів, враховуючи при цьому адміністративно-територіальний поділ України. Функціонування мережі автомобільних доріг загального користування має забезпечувати рівномірний наземний доступ в усі регіони України, а також безпечне і надійне переміщення людей та транспортування вантажів із належною ефективністю. Для цього потрібно: розробити методологію визначення ефективності функціонування мережі автомобільних доріг загального користування; розробити методологічні основи синтезу моделей прогнозування раціонального розвитку мережі автомобільних доріг на основі системного аналізу її функціонування через досягнення умов пропорційності та збалансованості; розробити моделі прогнозування необхідних обсягів ресурсного забезпечення виконання дорожніх робіт на підставі визначеного попиту з боку користувачів автомобільних доріг; розробити метод формування системи управління функціонуванням і розвитком мережі автомобільних доріг загального користування на основі суспільно-економічного прогнозування у вигляді ієрархічної структури елементів та їх взаємозв'язків. визначені головні напрямки визначення ефективності макrorівня функціонування мережі автомобільних доріг, а також аналіз впливу функціонування мережі автомобільних доріг на макродинаміку розвитку країни, синтез моделей прогнозування розвитку мережі автомобільних доріг, у тому числі: аналіз темпів та пропорцій суспільно-економічного відтворення; розробка основ прогнозування розвитку мережі автомобільних доріг та принципи і критерії оптимізації суспільно-економічної ефективності функціонування мережі автомобільних доріг як складової економічної системи суспільства.*

**Ключові слова:** мережа автомобільних доріг загального користування, транспортна система України, макrorівень функціонування економічної системи країни, ефективність функціонування, валовий внутрішній продукт, чистий національний продукт, національний дохід.

**Постановка проблеми.** Автомобільні дороги загального користування – це позаміські автомобільні дороги державної форми власності, що забезпечують внутрішні та міжнародні перевезення пасажирів і вантажів, враховуючи при цьому адміністративно-територіальний поділ України.

Мережею автомобільних доріг є сукупність автомобільних доріг, що пов'язує поміж собою населені пункти, промислові та сільськогосподарські центри. Автомобільні дороги є національним надбанням українського народу і важливою складовою транспортної системи України [1]. Їхній

транспортно-експлуатаційний стан суттєво впливає на соціально-економічний розвиток держави. Автомобільні дороги потребують відповідного утримання та ремонтів для підтримки їх у належному стані з метою забезпечення умов безперервного, безпечного та зручного руху транспортних потоків.

Головна ціль розвитку економіки – повне задоволення матеріальних і духовних потреб людей – членів соціуму. Їхня сукупність визначає суспільне споживання – підсистему суспільства, що формує вимоги до виробництва суспільних продуктів [2].

Суспільний продукт – це такий продукт, який не може бути наданий одній особі так, щоб не надати його в цей же час у розпорядження усім іншим. Причому, будучи наданий тільки одній особі, суспільний продукт може бути наданий усім іншим без додаткових витрат. Саме до такої категорії благ відносяться автомобільні дороги загального користування.

Для виробництва продукції, що задовольняє матеріальні потреби суспільства, необхідні ресурси (робоча сила, управлінські здібності, механізми та устаткування, у т.ч., автомобільні дороги й транспортні потоки, що рухаються ними), а також землі та природні ресурси. Діяльність, що здійснюється у межах організаційного механізму, називають економічною системою, в рамках її функціонує транспортна система України, до якої, у свою чергу, входить як її підсистема транспортно-дорожній комплекс, елементом останнього є мережа автомобільних доріг.

Отже, виникає потреба у застосуванні системного підходу – це поняття підкреслює значення комплексності, широти охоплення і чіткої організації у дослідженні, проектуванні та плануванні [3]. Системний підхід спирається на діалектичний закон взаємозв'язку й взаємозумовленості явищ у світі та суспільстві. Він вимагає розглядати досліджувані явища та об'єкти і як самостійну систему, і як підсистему деякої великої системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням функціонування мережі автомобільних доріг на економічну систему суспільства приділяли увагу вчена спільнота, зокрема в таких роботах [4–14]. У роботі [4]: «визначено чинники, які позначають втрати транзитних вантажопотоків та потребують вирішення на загальнодержавному рівні та корінного реформування транспортної сфери в цілому. Наведено потенційні можливості до залучення додаткових транзитних потоків. Розроблена методика до залучення додаткових транзитних потоків. У роботі [6] розроблено комплексний показник оцінки якості, який включає агреговані, блочні та одиничні критерії, дає змогу оцінити якість транспортного обслуговування. У роботі [7] запропоновано використання нових моделей, методів та алгоритмів для безперервного підвищення якості проектів, розроблених на основі міжнародних стандартів. У роботі [8] розроблена методика розміщення транзитного терміналу, яка забезпечує зниження транспортної роботи і підвищення ефективності при транзитних перевезеннях. Запропонована оцінка ресурсного забезпечення функціонування та необхідності

розвитку мережі автомобільних доріг у транспортній системі регіону «Автомобільні дороги державного та місцевого значення – Національні та міжнародні транспортні потоки». У роботі [9] наведено методику проектного аналізу вибору проектів перевезення вантажів на проектно-орієнтованих підприємствах, основна діяльність яких зосереджена в галузі міжнародних перевезень, розроблена з урахуванням якості за критеріями. У роботі [10] розроблені рекомендації по подальшому розвитку інтеграції національних транспортно-логістичних кластерів в міжнародну транспортну систему з використанням міжнародних транспортних коридорів.

Розроблено модель прогнозування необхідних обсягів ресурсного забезпечення виконання дорожніх робіт на підставі визначеного попиту з боку користувачів автомобільних міжнародних транспортних коридорів. У роботі [11] розроблена модель N-критеріальних оцінок прийняття оптимального рішення розроблена з урахуванням важливості набору критеріїв, якими визначається якість транспортного обслуговування як продукту проекту. Удосконалено N-модель прийняття оптимального рішення щодо важливості критеріїв з урахуванням експертної інформації. У роботі [12] запропоновані методи математичного програмування для проектування транзитних транспортних мереж. Розроблено метод формування системи управління функціонуванням і розвитком мережі автомобільних міжнародних транспортних коридорів на основі суспільно-економічного прогнозування у вигляді ієрархічної структури елементів та їх взаємозв'язків. У роботі [13] наведені різноманітні методи вирішення проблем побудови оптимальних маршрутів транспортних перевезень. Розроблено методологію визначення ефективності функціонування мережі автомобільних міжнародних транспортних коридорів. У роботі [14] надана характеристика різних видів транспортних систем, наведені основні напрями оптимізації транспортних систем без врахування проміжних транспортних пунктів» [4].

**Виклад основного матеріалу.** Світовий досвід довів, що ринок є найбільш працездатною й доцільною системою виробництва та розподілу, яка залучає у творчу роботу все населення, дозволяє максимально використовувати індивідуальні можливості кожної людини. Це, у свою чергу, сприяє досягненню найвищої продуктивності праці та високого рівня життя. Формування ринкових відносин стимулювало зростання економіки, підвищення суспільного багатства та добробуту населення.



Перехід України до ринкових конкурентних відносин є складним процесом. Ліквідація командно-адміністративної системи управління народним господарством, приватизація, впровадження різних форм власності, розвиток підприємницької діяльності, перебудова системи фінансів та ціноутворення, активізація роботи бірж створило нові умови господарювання в Україні й, особливо, умови функціонування окремих галузей економіки, у тому числі, також і транспортної системи України.

Це вплинуло на зміну суспільно-політичного устрою держави, завдало зміни у транспортно-дорожньому законодавстві України. Децентралізація системи управління та постачання призвела до виникнення значної кількості малих підприємств, які перевозять малі партії вантажів без перевантажень та централізованого складування. Зросли міжнародні перевезення. Підвищення інтенсивності руху, вантажопідйомності автомобілів негативно вплинуло на транспортно-експлуатаційний стан мережі автомобільних доріг. Якщо зараз не прийняти необхідних рішень щодо підвищення ефективності функціонування мережі доріг, вже дуже швидко автомобільні дороги стануть непридатними для користування.

Макрорівень аналізу функціонування мережі автомобільних доріг дозволяє визначити існуючі матеріально-речовинні та інформаційні зв'язки,

а також вплив цієї мережі доріг на поточні процеси, які відбуваються в економічній системі та суспільстві України.

Економіка є системою суспільного виробництва. Вона здійснює: власне виробництво, розподіл, обмін і споживання необхідних суспільству матеріальних та духовних благ. Базуючись на економічному аналізові суспільного виробництва, розглянемо матеріально-речовинні та інформаційні перетворення, а також зв'язки в суспільно-економічній системі, елементом якої є мережа автомобільних доріг.

Економічну систему ( $E$ ) можна представити як перетин двох систем більш високого рівня: макросистеми суспільство ( $S$ ) та макросистеми ресурси ( $Q$ ) (рис. 1).

З точки зору суспільства економіка виступає як «живильний блок» його функціональної підсистеми, що перетворює зовнішні, природні ресурси ( $N$ ) у придатні до споживання продукти (товари та послуги) й постачає їх споживачам або користувачам ( $C$ ).

Під час розгляду економіки в якості суспільної підсистеми ( $E \supset S$ ) визначальними стають суспільно-економічні аспекти її аналізу. При вивченні економіки в якості підсистеми ресурсів ( $E \supset Q$ ) на перший план виступають ресурсно-технологічні аспекти її аналізу. Відповідно до таких вихідних позицій при аналізі економіки як системи громадяни – члени суспільства – виступають подвійним чином: як споживачі, які задають виробництву його мету, та як трудові ресурси. Отже, вони також є функціональним елементом утворення ВВП.

Економіка може вивчатися як відносно відособлена система – перетворювач потоку  $N \rightarrow C$ , пов'язаний своїми входами та виходами з природним і суспільним середовищами. Аналогічно можна вивчати й кожен окрему підсистему, що є окремими перетворювачами. Завдяки такому аналізу з'ясується внутрішня структура економіки та її елементів (у тому числі, функціонування мережі автомобільних доріг), їхні взаємозв'язки, що визначаються накладенням і взаємодією суспільно-економічних та ресурсно-технологічних чинників.

У кожний момент можна розрізнити три функціональні входи в економічну систему (рис. 2):  $N$  – земля (природні ресурси),  $K$  – капітал (засоби виробництва) та  $L$  – людська праця. Їх цілеспрямоване перетворення і є процесом виробництва  $B$  споживчих благ (товарів та послуг –  $Z$ ).

Раніше було прийнято вважати, що засвоєні природні ресурси (сировина, матеріали, елек-

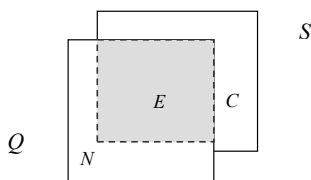


Рис. 1. Зв'язки «Ресурси – Економіка – Суспільство»

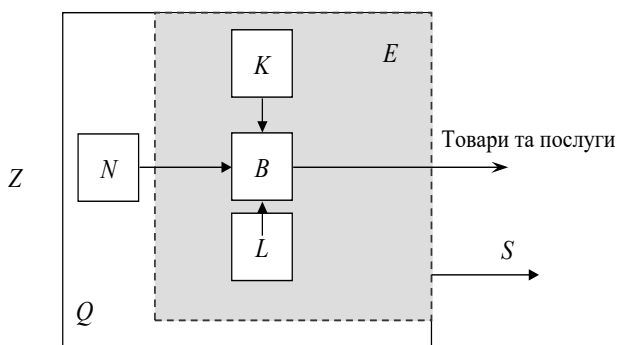


Рис. 2. Процес виробництва споживчих благ (товарів і послуг)

троенергія, паливно-мастильні матеріали і т.п.), виступають як частина засобів виробництва. Тому на макрорівні аналізу функціонування економічної системи нерідко розрізняли лише два види ресурсів: капітал і людська праця, тобто виділяли два входи:  $K$  та  $L$ . Питання при цьому полягало в тому, де провести межу, що виокремлює економічну систему із суперсистеми ресурсів, тобто, як відокремити її від природних ресурсів, завжди було дуже актуальним. Від цього залежить, яким ресурсам варто давати економічну оцінку, на відміну від зовнішніх «готових» ресурсів.

У зв'язку з необхідністю раціонального використання та збереження широкого кола ресурсів, має переважати тенденція урахування усіх складових ( $N$ ,  $K$  та  $L$ ).

Залежність виходу економічної системи від співвідношення її входів кількісно моделюється за допомогою виробничих функцій.

Економічна система має задовольняти визначений клас потреб суспільства. Вимоги, поставлені суспільством до своєї економічної системи, є «зовнішнім» (стосовно економіки) критерієм функціонування. Як засіб завдання «зовнішніх» вимог, так і «внутрішній» механізм функціонування економічної системи обумовлені характером відношень власності та типом виробничих відносин. Цим істотно визначається зміст і, особливо, структура потреб суспільства, у тому числі, користування мережею автомобільних доріг як суспільним продуктом.

Поняття суспільних потреб та їх задоволення формується в рамках суспільної системи, у складному переплетенні суспільних цілей, цінностей та норм, соціально-політичних і економічних інтересів, що накладаються на індивідуальні та колективні потреби різних соціальних груп суспільства, що взаємодіють на всіх рівнях цієї системи. Споживання створює необхідність нового виробництва і є, щодо нього, визначальним.

Але виробництво не тільки поставляє матеріал для споживання. Своім розвитком воно породжує нові потреби. Структура потреб змінюється й набуває суспільно спрямованого характеру. Зміна потреб призводить до внутрішніх структурних зсувів як в інших потребах, так й у відповідних галузях виробництва. Мобільність населення, що постійно зростає, зажадала не тільки розвитку транспортних засобів, але й будівництва відповідної за якістю та щільністю мережі автомобільних доріг, створення індустрії туризму і т.д.

Спектр потреб «речовина – енергія – інформація – вільний час» є пов'язаним як із зміною

потреб, так і самого виробництва. Потреби значно розширили зміст і структуру вимог, поставлених суспільством до економіки. Вище охарактеризована внутрішня структура потоку виробництва ( $Z$ ). Відповідно мають бути конкретизовані й вимоги до цього потоку від суспільства. Вони визначають формулювання критеріїв в оптимізаційних макромоделях. Саме ринковий механізм формує вимоги до валового внутрішнього продукту (ВВП)  $Z$ . Він визначає попит і ціни на засоби виробництва ( $K$ ) та робочу силу ( $L$ ). Держава за допомогою кредитно-фінансового регулювання робить визначений вплив на потік  $Z$ .

Управління економічною системою країни може здійснюватиметься різними засобами: у плановій економіці задавалася структура всього валового продукту ( $Z$ ), включаючи й виробниче споживання самих підприємств ( $X$ ), що відповідало дійсності. У цьому випадку економіка ніяк не виділялася із суспільно-економічної системи. Суспільство через уповноважений ним орган – Держплан, шляхом планових завдань визначало обсяг і структуру ВВП, формувало внутрішні зв'язки між елементами економіки в такій же мірі, як й її зв'язки з іншими елементами суспільної системи. У цьому випадку критерієм оцінки потоку  $Z$  природно було вважати максимізацію випуску валової продукції (або темпу росту ВВП) з урахуванням виділення пріоритетних, ключових галузей народного господарства. Такий критерій був особливо характерний для періоду індустріалізації країни, ліквідації її економічної відсталості та залежності.

Перший крок відокремлення економіки на сучасному етапі розвитку суспільства полягає в тому, що поточні виробничі споживання інвестиційних товарів ( $X$ ), а потім і реновація основних фондів (у нашому випадку – утримання мережі доріг –  $G_r$ ) розглядаються як внутрішньо-економічні процеси.

Тоді на виході економічної системи залишається чистий національний продукт (ЧНП)  $V$  або національний доход (НД)  $Y$ , а суспільство через попит має задавати лише їх обсяг і структуру. Відповідно критерієм оцінки потоку  $Z$  стає максимізація ЧНП  $V$  або НД  $Y$  в заданій структурі. Внутрішні поточні зв'язки між елементами економічної системи встановлюються на основі саморегулювання зовнішніх вимог суспільства до її виходу. Цей крок відокремлення економіки пов'язаний з її динамікою. Якщо накопичення ( $G$ ), що забезпечує розвиток економічної системи, також вважати внутрішньо-економічним

процесом, тоді на виході залишається потік  $C$  – продукт для невикористаного (суспільного та індивідуального) споживання. Саме ця частина потоку  $Z$  безпосередньо задовольняє індивідуальні та колективні потреби суспільства. Усі інші компоненти потоку  $Z$  є засобом, що забезпечує отримання продуктів невикористаного споживання. Тоді критерієм оцінки потоку  $Z$  є максимізація невикористаного (суспільного та індивідуального) споживання, наприклад, користування автомобільними дорогами власниками індивідуальних автомобілів.

На кожному наступному етапі зовнішній критерій функціонування економічної системи має усе більш чітко виражати кінцеву мету виробництва – споживання. Відповідно до цього перерозподіляються інші елементи економічної системи. Вони розглядаються вже не як априорно задані зовнішні параметри, а пов'язуються одне з одним у якості внутрішніх перемінних економічної системи. Аналіз внутрішніх зв'язків в економіці потребує її аналізу як відокремленої системи.

Виходи економічної системи неоднорідні за своїм речовинним складом і функціональним призначенням (рис. 3).

Узагальнений вихід економічної системи – це результат функціонування суспільного виробництва. Він утворює ВВП ( $Z$ ) і обчислюється як сума врахованих валових випусків продукції усіх підприємств, у тому числі, транспортних.

Протягом року визначена його частина ( $X$ ) споживається в економічній системі: якісь підприємства поставляють іншим сировину, комплектуючі, електроенергію, паливно-мастильні матеріали та інші матеріальні елементи оборотних фондів.

Це поточне виробниче споживання інвестиційних товарів. Частина ВВП  $Z$ , що залишилася, виходить за рамки економічної системи у даному періоді (році)  $T$ . Її називають ЧНП  $V$ :

$$V = Z - X. \quad (1)$$

ЧНП у натуральній формі включає не тільки предмети споживання, але й засоби виробництва. Вони необхідні для заміни устаткування, будинків, споруд, що застаріли, новими, тобто для реновації основних фондів (потік  $G_r$ ), а також для подальшого виробництва, за рахунок виробленого додаткового устаткування, споруд, а також сировини, палива та ін., тобто, за рахунок приросту основних і оборотних засобів (потік  $G$ ). На практиці реновація завжди забезпечує відоме збільшення виробництва – нове обладнання продуктивніше старого. У цьому сенсі потоки  $G_r$  і  $G$  пов'язані з розширенням виробництва та є накопиченням. У вартісній формі вони утворюють валові інвестиції  $G_s$ :

$$G_r = G - G_s. \quad (2)$$

Реновація основних фондів покривається амортизаційними відрахуваннями попередніх років і поточного року. Ця вартість, як і вартість витраченої сировини та матеріалів, перенесена в даному році на виробничий продукт, а не створена. Проте іноді реновацію помилково відносять до поточного виробничого споживання і виключають її з кінцевого продукту, під яким розуміють потік  $Y$ . Тому національним доходом  $Y$  є лише вартість потоку:

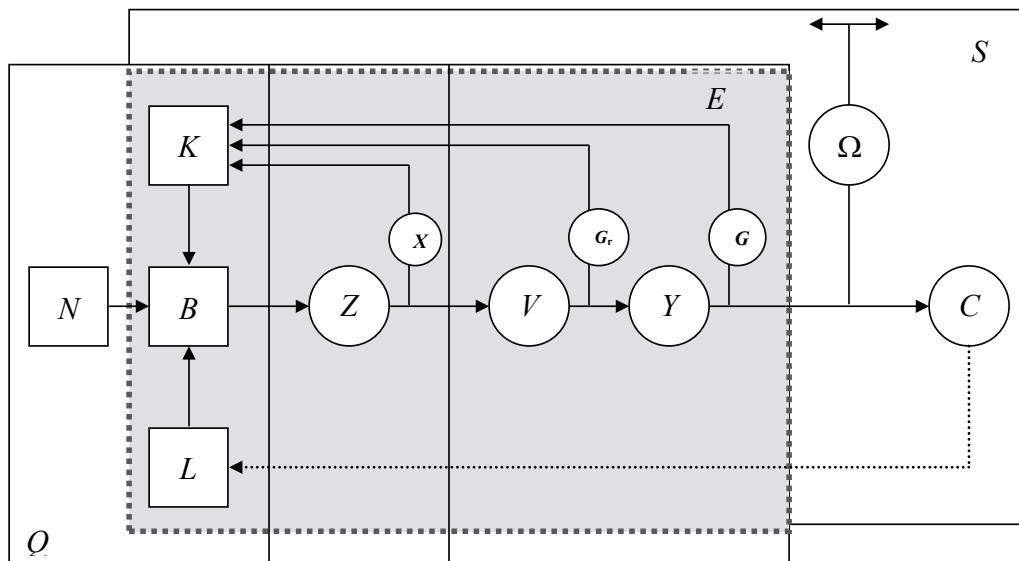


Рис. 3. Матеріально-речовинний склад і функціональне призначення виходів економічної системи

$$Y = Z - (X + G_r), \quad (3)$$

тобто з вартості ВВП треба відняти витрати на поточне виробниче споживання та реновацію. Чисті інвестиції (капвкладення  $G$ ) покриваються з національного доходу.

Накопичення (заощадження) – основний чинник економічної динаміки, воно забезпечує розвиток економічної системи. Ця частина кінцевого продукту (національного доходу) згодом повертається в економічну систему. Причому до накопичення варто прираховувати приріст як матеріально-речовинних запасів, так і вкладення у соціальну сферу (охорона здоров'я, освіта, наука).

Інша частина кінцевого продукту покидає його назавжди – це чистий кінцевий продукт, чисте кінцеве невиробниче споживання  $C$ :

$$C = V - (G_r + G) \quad (4)$$

Поряд із корисними продуктами, економіка виробляє й відходи – негативний вплив на довкілля, а також, при функціонуванні автомобільних доріг, скоєння ДТП. Скорочення та утилізація цього виходу економічної системи стає усе більш нагальним.

Невиробниче споживання є кінцевим виходом економічної системи, якщо розглядати його матеріально-речовинний аспект. Проте воно робить зворотний та зростаючий вплив на економіку. Так, у споживанні населення істотну частку складає споживання зайнятих в економіці осіб, що означає підтримку та розвиток особистих ресурсів (потік  $C \rightarrow L$  на рис. 3). Краще харчування, медичне обслуговування, освіта, підвищення інтелектуального рівня та фахової підготовки покращують якість цього ресурсу й забезпечують приріст продуктивності праці.

За рахунок невиробничого споживання утримується система, що забезпечує економіку інформацією про технологію та організацію її функціонування. Як правило, інформація безпосередньо забезпечує зростання обсягу та ефективності, якість тих або інших виробничих ресурсів і продуктів. До невиробничого споживання ставиться й адміністративний апарат управління, який пов'язаний з регламентацією та регулюванням економіки. На цій стадії аналізу ще не розділяються матеріальні, енергетичні та інформаційні потоки і можна вважати, що носіями цього інформаційного впливу є суб'єкти економічної

системи. В їх сукупній праці усе більш питому вагу мають інформаційно-управлінські функції, а не фізична праця.

Стосовно до кожного даного блоку, як системи перетворення ресурсів, останні є зовнішніми чинниками, що надходять на вхід виробничого процесу. У динаміці можна виявити, що частина вихідного потоку, тобто результатів виробництва, надходить знову на вхід даного елемента, створюючи замкнуту петлю. Дійсно, потоки  $X$ ,  $G_r$ ,  $G$  і, врешті-решт,  $C \rightarrow L$  відображають зворотні зв'язки в економіці як матеріальному перетворювачеві. Визначення їхніх обсягів, співвідношень та структури є центральною проблемою суспільно-економічної динаміки.

**Висновки.** Головними напрямками визначення ефективності макrorівня функціонування мережі автомобільних доріг є:

1. Аналіз впливу функціонування мережі автомобільних доріг на макродинаміку розвитку країни, у тому числі:

- аналіз співвідношення ВВП та ЧНП у залежності від ефективності макrorівня функціонування мережі автомобільних доріг;

- аналіз залежності «Державні інвестиції – Функціонування мережі автомобільних доріг – Чистий національний продукт»;

- визначення впливу запізнювань у ресурсному забезпеченні функціонування мережі автомобільних доріг, що призводить до їх «недоремонту»;

- визначення впливу термінів ефективного функціонування мережі доріг на темп приросту ЧНП (визначення необхідних обсягів ресурсного забезпечення);

- визначення впливу роботи автомобільного транспорту як складової транспортної системи на темпи приросту чистого національного продукту;

- аналіз мультиплікативного ефекту від ресурсного забезпечення дорожнього господарства та його вплив на формування національного доходу країни.

2. Синтез моделей прогнозування розвитку мережі автомобільних доріг, у т.ч.[4]:

- аналіз темпів та пропорцій суспільно-економічного відтворення;

- розробка основ прогнозування розвитку мережі автомобільних доріг.

3. Визначення принципів та критеріїв оптимізації суспільно-економічної ефективності функціонування мережі автомобільних доріг як складової економічної системи суспільства.

## Список літератури:

1. Закон України від 10.11.1994 р. № 232/94-ВР «Про транспорт». URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр>.
2. Макконнелл К. Р. Экономикс: принципы, проблемы и политика / [Макконнелл К. Р., Брю С. Л.] ; [Пер. с англ. 11-го изд.]. К. : ХаГар, 1998. 785 с.
3. Системологія на транспорті. Кн. 1: Основи теорії систем і управління / [Гаврилов Е. В., Доля В. К., Лановий О. Т. та ін.] ; під ред. М. Ф. Дмитриченка. К. : Знання України, 2005. 344 с.
4. 4.Кисельов В.Б. Математичне модулювання впливу функціонування мережі автомобільних доріг на економіку України / Кисельов В.Б., Лановий О.Т. Кошарний О.М. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том. 33 (72) № 1. 2022.
5. Мазуренко О.О. Перспективи подальшого розвитку міжнародних транспортних коридорів України / Мазуренко О.О., Кудряшов А.В. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 2. С. 25–30.
6. Концева В.В. До питання вибору магістралей для аналізу транспортних потоків / В.В. Концева, Т.В. Макарова. *Зб. наук. праць ДААТ*. 2015. № 4. С. 8–12.
7. Прейгер Д. К., Реалізація потенціалу транспортної інфраструктури України в стратегії посткризового економічного розвитку / Д. К. Прейгер, О. В. Собкевич, О. Ю. Ємельянова К. : НІСД. 2014. С. 37–40.
8. Чернявська Т. А. Стратегічні напрями розвитку транспортно-комунікативної системи України в контексті забезпечення національної безпеки і самодостатності. *Вісн. Нац. гірн. ун-ту*. 2015. № 3. С. 68–76
9. Брагінський В. В. Розвиток транспортно-логістичної системи як форма реалізації транзитного потенціалу України. *Державне управління: теорія і практика*. 2014. № 2. URL: <http://www.academy.gov.ua/ej/ej14/index.htm>.
10. Михайличенко К. М. Відновлення транзитного потенціалу як чинник підвищення конкурентоспроможності України. *Стратегічні пріоритети*. 2015. № 4. С. 59–65.
11. Механізми ефективного використання та розвитку потенціалу транспортно-дорожнього комплексу України: аналіт. доп./ О.В. Собкевич, К.М. Михайличенко, О.Ю. Ємельянова. К. : НІСД, 2014. 60 с.
12. Cancela, H. Mathematical programming formulations for transit network design [Text] / H. Cancela, M. Mauttone, E. María. *Transportation Research. Part B: Methodological*. V.77. 2015. P. 17–37.
13. Sung, S. Various Method to Solve the Optimality for the Transportation Problem [Text] / S. Sung, G. C. Dubey, R. Shrivastava. *Statistical Mechanics and its Applications*. V. 12. 2016. P. 161–169.
14. Teodorovic, D. (2016). Transportation Systems. [Text] / D. Teodorovic, M. Janic. *Transportation Engineering*. 2016. N 2. P. 5–62.

### Kiselyov V.B., Lanovyi A.T., Kosharnyi O.M. MACROECONOMIC IMPACT OF UKRAINE'S ROAD NETWORK

*Public highways are suburban state-owned highways that provide domestic and international transportation of passengers and goods, taking into account the administrative-territorial division of Ukraine. The functioning of the network of public roads should ensure uniform land access to all regions of Ukraine, as well as safe and reliable movement of people and transportation of goods with appropriate efficiency. This requires: to develop a methodology for determining the effectiveness of the network of public roads; to develop methodological bases of synthesis of models of forecasting of rational development of a network of highways on the basis of the system analysis of its functioning through achievement of conditions of proportionality and balance; develop models for forecasting the required amount of resources for road works on the basis of a certain demand from road users; to develop a method of forming a system for managing the functioning and development of the network of public roads on the basis of socio-economic forecasting in the form of a hierarchical structure of elements and their relationships. The main directions of determining the effectiveness of the macro level of the road network, as well as analysis of the impact of the road network on the macrodynamics of the country, the integration of models for forecasting the development of the road network, including: analysis of rates and proportions of socio-economic reproduction; development of bases for forecasting the development of the road network and the principles and criteria for optimizing the socio-economic efficiency of the functioning of the road network as part of the economic system of society.*

**Key words:** network of public roads, transport system of Ukraine, macro level of functioning of the economic system of the country, efficiency of functioning, gross domestic product, net national product, national income.

**Мельник О.М.**

Одеський національний морський університет

**Онищенко О.А.**

Національний університет «Одеська морська академія»

**Васалатій Н.В.**

Одеський національний морський університет

**Корякін К.С.**

Одеський національний морський університет

**Пуляєв І.О.**

Одеський національний морський університет

**Щенявський Г.С.**

Одеський національний морський університет

## ТЕХНОЛОГІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ПРОЦЕСІ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ МОРЕПЛАВСТВА

*Поступове впровадження інформаційних технологій, що спрямовані на вдосконалення інформаційного обміну в галузі морського транспорту – комплексне завдання, яке вимагатиме об'єднання зусиль як на місцевому так і міжнародному рівні. Реалізація цієї концепції дозволяє вирішити такі завдання, як підвищення навігаційної безпеки та мінімізація транспортних аварій і пригод, моніторинг та регулювання транспортних потоків; захист людей, морського середовища та ресурсів, поліпшення умов безпеки судноплавства. Визначено, що розроблення надійних методик оцінки ефективності технологій обміну інформацією для забезпечення процесу судноводіння, надасть можливість для розвитку таких технологій і в інших секторах транспортної галузі. В процесі розроблення технічних рішень щодо підтримки е-Навігації, виникає необхідність розроблення методик для оцінки якості цих рішень, залежно від потреб користувачів та визначення їх ефективності. З'ясовано що концепція електронної навігації зумовлює процес інформаційного обміну та пропонує комплексне використання сучасних технологій що значно підвищує ефективність навігаційно-гідрографічного та гідрометеорологічного забезпечення безпеки мореплавства, організацію пошуку та порятунку суден, що зазнають лиха та безпеку навігації в цілому. Це актуальне завдання забезпечує цілісний погляд на використання технологій обміну інформацією та можливий шлях розвитку світової системи забезпечення безпеки людей, вантажів, та об'єктів навігації у всіх середовищах, що виконують будь-яке спеціальне завдання в процесі руху. У статті розкрито значення електронної навігації та її функціональні можливості, які ґрунтуються на основі стандартного інтерфейсу користувача і єдиної системи управління, що спрямована на підвищення безпеки морського судноплавства шляхом забезпечення надійності морських телекомунікацій та скорочення числа аварій і збитків для морського середовища.*

**Ключові слова:** безпека мореплавства, інформаційні технології, судноводіння, оптимізація процесу обміну інформацією.

**Постановка проблеми.** Необхідність реалізації концепції електронної навігації (е-Навігація) спричинена проблемами, що впливають на безпеку та ефективність судноплавства. Вона являє собою дезінтеграцію існуючих технологій навігації та управління судноплавством, що ускладнює оперативний обмін навігаційною інформацією для забезпечення безпеки судноплавства. Відсутність стандартів для

берегового та судового навігаційного обладнання та універсальних правил їх застосування, зростаючий ризик впливу людського фактору на безпеку процесу навігації суден при збільшенні рівня автоматизації та інтеграції судового та берегового обладнання серед актуальних завдань що потребують вирішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом суттєвого прогресу та перспективного

розвитку набуло застосування інформаційних технологій у сфері торговельного мореплавства. Ключовими напрямками стали е-Навігація та технології безпекажного судноводіння. На цих аспектах зосередила свої ініціативи Міжнародна морська організація (ІМО) [8]. Питанням впровадження концепції електронної навігації було присвячено праці численних вчених. Це відображено у роботах [1; 2] де розглядаються сукупність складових та елементів концепції та її застосування і зв'язок з впливом людського елементу. У наукових працях [9; 11; 15] було присвячено увагу системам зв'язку для забезпечення безпеки та охорони суден та вивченню головних чинників процесу імплементації електронної навігації. Питання щодо вдосконалення начальних програм та необхідності оновлення стандартів підготовки судноводіїв та користувачів е-Навігації у [5]. Використання сучасних технологій та їх інтеграція у процес судноводіння, аналіз стану існуючих технологій та перспективи реалізації технології електронної навігації у [3; 4; 6; 7]. Дослідження перспектив технологічного розвитку і впровадження концепції безпекажних суден у [12–14]. Питання безпеки експлуатації морського транспорту, аналіз ступеня ситуаційної обізнаності членів екіпажів морських суден, розроблення сучасних методик оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення у [10; 16–18].

**Виклад основного матеріалу.** Узгодження регіональних систем навігації і контролю за рухом суден – технічні рішення, що становлять частину е-Навігації, розробляються на базі існуючих технологій у різних регіонах земної кулі, тому їх необхідно постійно узгоджувати та координувати на міжнародному рівні. Ці регіональні системи складаються із систем, що розробляються в рамках різних проектів: європейського проекту MarNIS (Морська навігація та інформаційне забезпечення), азіатського МЕН (Електронні засоби навігації для забезпечення судноплавства в азіатському регіоні (Asian Marine Electronic Highway), Safe Sea Net (режим інспектування із забезпечення безпеки судноплавства) та ін.

Наростаюче застосування нових технологій змінює методику роботи операторів служб, що забезпечують судноплавство, тому ключовим аспектом е-Навігації є розвиток методики застосування технологій та навчання, що має відбуватися одночасно з розвитком технологій. Використання автоматизованих систем підтримки прийняття рішень на основі інформаційної взаємодії, змінить методику роботи та роль операторів берегових та наземних служб та операторів судових систем до складу яких відносяться:

- АІС – автоматичні ідентифікаційні системи, (AIS – Automatic Identification System) та берегові системи управління рухом суден (VTS – Vessel Traffic Services);
- ЕКНІС – електронно-картографічні навігаційні інформаційні системи (ECDIS – Electronic Chart Display and Information System);
- ІНС – інтегровані навігаційні системи (INS – Integrated Navigation Systems), інтегровані системи ходового містка (IBS – Integrated Bridge Systems);
- ЗАРП – засоби автоматичної радіолокаційної прокладки (ARPA – Automatic Radar Plotting Aids);
- РНПтаС – радіонавігаційні прилади та системи судна та берегових станцій, системи далекої ідентифікації і стеження (LRIT – Long Range Identificat and Tracking);
- ГМСЛЗБ – глобальної морської системи зв'язку під час лиха та для забезпечення безпеки мореплавства (GMDSS – Global Maritime Distress Safety System).



**Рис. 1. Основні компоненти системи інформаційного обміну**

Впровадження АІС, стимулювало безліч нових досліджень і інновацій та відкрило можливості для появи різних ІТ-застосувань, які можна використовувати не лише для забезпечення безпеки суден, але і також використовувати для захисту довкілля і забезпечення безпеки морських об'єктів. Підприємства та компанії, які у своїй виробничій діяльності активно підтримують розвиток технологій інформаційної взаємодії, беруть участь у формуванні стандартів морського обладнання та електронно-картографічного забезпечення. Робота з уніфікації та стандартизації судового обладнання, сприяє розробленню експлуатаційних стандартів для інтеграції інформації, що надходить від РЛС, АІС та ЕКНІС. У цьому підкреслюється важливість обов'язкового оснащення всіх морських суден електронними картографічними

системами, без яких можливості ефективного застосування сучасних засобів навігації, суттєво обмежені для створення інтегрованої системи електронної навігації.

В даний час активно впроваджується стандарт на суднове та берегове навігаційне обладнання, створюється програми та посібники з їх застосування, включаючи вимоги до тренажерів та програм підготовки фахівців та спеціалістів для комплексу суднових та берегових засобів та систем забезпечення безпеки мореплавання таких як суднові системи охоронного оповіщення (ССОО), системи управління рухом суден (СУРС).

Разом з тим, необхідно підкреслити, що існуючі в даний час на морському флоті технології обміну навігаційною та іншою інформацією для забезпечення безпеки мореплавання, не зможуть забезпечити своєчасний, якісний та ефективний обмін інформацією в рамках е-Навігації. Проблеми стосуються обмеженнями пропускної здатності каналів передачі даних, вартості трафіку, залежності від бездротової технології тощо. При цьому зазначено, що система ГМСЗЛБ при впровадженні нових технологічних рішень, зможе забезпечити вирішення завдань з пошуку та рятування у контексті е-Навігації.

Передбачається, що в результаті застосування технологій інформаційної взаємодії, ризик людської помилки, пов'язаний із розгубленістю персоналу, буде мінімізовано за рахунок зниження навантаження на спеціалістів, що приймають рішення як на судні та на березі, шляхом надання їм узагаль-

неної інформації та із застосуванням зручного та зрозумілого інтерфейсу, тому необхідно розроблення вимог щодо психологічного та фізіологічного стану суднового та берегового персоналу, а також критеріїв та методів визначення відповідності цим вимогам. Тому головною метою електронної навігації залишається уніфікація та стандартизація суднового та берегового навігаційного обладнання та розробка єдиних правил та посібників з управління рухом суден; можливість підготовки суднових та берегових фахівців за єдиними вимогами та правилами; зниження ступеня впливу людського чинника прийняття рішення з допомогою підвищення рівня автоматизації процесів, отримання та обробки інформації, що у пріоритеті задля забезпечення безпеки мореплавання. Крім того, підвищиться ступінь інформаційної та системної інтеграції суднових та берегових навігаційно-інформаційних систем, а також ефективність аналізу інформації за рахунок оперативного отримання та застосування єдиної універсальної методики її обробки. Таким чином створюються умови для використання та обміну інформацією між представниками різних організацій для забезпечення безпеки мореплавання та охорони навколишнього середовища, так і для забезпечення морської безпеки (охорони) суден та портових споруд, у тому числі під час проведення антитерористичних заходів (рис. 2).

Поруч з цим впровадження нових технологій докорінно змінило звичайну практику роботи судноводіїв, що змінило підхід та вносить зміни до ідеології сучасної навігації та судноплавства в цілому.

Ефективність функціонування системи інформаційної взаємодії на судах, і в берегових службах забезпечується шляхом аналізу та опрацювання: даних від електронних карт та джерел, інформації про погоду, систем позиціонування, інформації про маршрут, курс, маневрені елементи судна, обміну навігаційною інформацією з використанням АІС у режимах «судно-судно», «судно-берег» та «берег-судно», відображенні поточної інформації на судах та в берегових службах з використанням ЕКНІС; системи оповіщення та тривожної сигналізації на судні та на березі при виникненні небезпечних ситуацій, передачі сигналів лиха та інформації щодо безпеки мореплавання. В цілому передбачається, що можливості технологій інформаційного обміну будуть однаково корисні як для судновласників



Рис. 2. Користувачі концепції е-Навігація



і операторів суден, так і для різних служб, пов'язаних із судноплавством. Концептуальна модель технології інформаційного обміну що дозволяє приймати ефек-

тивні управлінські рішення в системі «берег-судно», на основі аналізу поточної інформації для забезпечення безпеки мореплавства представлена на рис. 3.

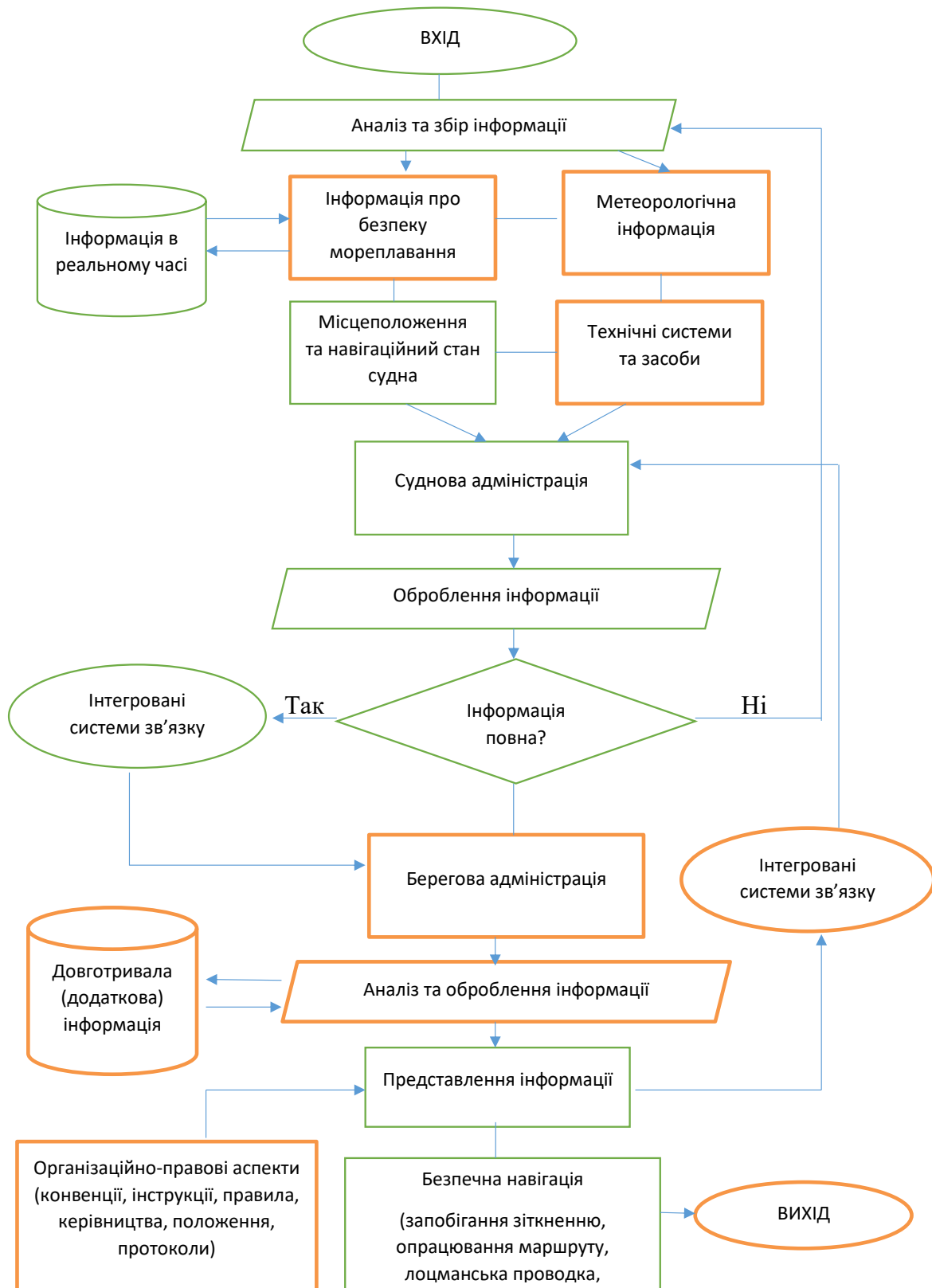


Рис. 3. Концептуальна модель технології інформаційного обміну

Підвищення ефективності інформаційного обміну надає так переваги як зменшення робочого навантаження на екіпажі суден, зменшення витрат судноплавних компаній, портів та прибережних держав, забезпечення взаємодії з іншими видами транспорту та підвищення ефективності роботи інших організацій, що пов'язані із судноплаванням.

Тенденції розвитку сучасного судноплавання зумовлюють необхідність більш ефективного обміну великим обсягом інформації між суднами та між суднами та береговими службами. Розвиток технологій зробить ідентифікацію та точне супроводження суден за межами зон дії існуючих систем управління рухом суден, більш ефективним за допомогою систем далекого виявлення та супроводу, а також наземних та супутникових систем прийому сигналів АІС. Все більше значення для безпечного управління судноплаванням, в тому числі і за допомогою систем управління рухом суден набуватиме всеосяжна та ефективна оцінка ризиків. Зросте ймовірність того, що в управлінні судном все більше значення будуть набувати «вказівки», за аналогією з управлінням повітряним рухом, а не просто інформування та видача рекомендацій.

**Висновки.** Як зазначено, електронна навігація спрямована на підвищення безпеки морського судноплавання і забезпечення надійності мор-

ських телекомунікацій, шляхом оптимізації процесу обміну інформацією, що в свою чергу має за мету скорочення числа аварій і збитків для морського середовища. Безперервний процес вирішення завдань щодо вибору технологій та методики визначення рівня ефективності забезпечення процесу безаварійної експлуатації суден, досягається шляхом стандартизації взаємодії бортових та берегових систем, забезпечення сумісності обладнання суден та зниження рівня складності приладів. Особлива увага приділяється людському фактору, причому як на рівні розробки технічних рішень так і в частині професійного навчання. В цьому контексті очікується зниження кількості навігаційних аварій, викликаних внаслідок впливу людського фактору, за рахунок впровадження і реалізації інструментів, які підтримують ефективність прийняття рішень з метою запобігання виникненню аварійних ситуацій. Вочевидь, що впровадження у практику судноводіння принципів е-Навігації вимагатиме перегляду програм підготовки судноводіїв та пошуку і дотримання необхідного балансу між методами традиційної навігації та е-Навігації. Втім у процесі підготовки судноводіїв акцент повинен ставитися на уникнення надмірного захоплення методами е-Навігації що загрожує підвищенням ризиком неправильних дій у разі вимушеного переходу на методи традиційної навігації.

#### Список літератури:

1. Patraiko D. (2007) The Development of e-Navigation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 1, No. 3, pp. 257–260.
2. Patraiko D., Wake P., Weintrit A. (2010) e-Navigation and the Human Element. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 4, No. 1, pp. 11–16.
3. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении [Электронное учебное пособие] / Л.Л. Вагущенко – Одесса–ОНМА. 2013. 135 с.
4. Бичковський Ю.В., Мельник О.М. (2022). Роль та місце людського елемента у ситуації навалу або зіткнення судна з причалом. *Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Технічні науки* 33(72) № 1. С. 270–276.
5. Jurdziński M. (2020) The Need to Update the Navigation Curriculum as a Consequence of Adoption the e-Navigation Model. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 14, No. 3, doi:10.12716/1001.14.03.03, pp. 541–544.
6. Титов А. В. Состояние и перспективы реализации технологии е-навигации / А. В. Титов, Л. Баракат, А. Хаизаран. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2019. № 4(56). С. 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630
7. Стратегія розвитку і впровадження е-Навігації. (Резолюція MSC 85/26/Add.1) e-Navigation strategy implementation plan.
8. Weintrit A., Wawruch R., Specht C., Gucma L., Pietrzykowski Z. (2007) Polish Approach to e-Navigation Concept. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 1, No. 3, pp. 261–269.
9. Korcz, K. (2016) Communication systems for safety and security of ships, *Journal of KONES*, Vol. No. 1, pp. 153–160.
10. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022) Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 114, 91–101. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8>

11. Main Aspects of a Maritime E-Navigation Project. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336802337\\_Main\\_Aspects\\_of\\_a\\_Maritime\\_E-Navigation\\_Project](https://www.researchgate.net/publication/336802337_Main_Aspects_of_a_Maritime_E-Navigation_Project) (дата звернення 29.01.2022).
12. Титов А. В. Перспективи технологічного розвитку і впровадження безпеки суден / А. В. Титов, Л. Баракат. // *Морські інтелектуальні технології*. 2018. № 1-3(41). С. 94–103.
13. Rodseth O. J. (2014) A system architecture for an unmanned ship / O. J. Rodseth, A. Tjora // Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT).
14. Burmeister H. C. (2014) Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective / H. C. Burmeister, W. Bruhn, O. J. Rodseth, T. Porathe. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. Vol. 1. – pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.002.
15. Pillich B. Developing e-Navigation, the early stages / B. Pillich. URL: <http://ushydro.thsoa.org/hy07/0901.pdf> (дата звернення: 26.06.2019).
16. Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення / О.М. Мельник, Ю.В. Бичковський. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2 (9). С. 37–46. DOI:10.33082/td.2021.2-9.03.
17. Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства / О.М. Мельник, Ю.В. Бичковський. *Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Технічні науки*. 2021. 32(71) № 4. С. 260–264.
18. Onyshchenko, S., Shibaev, O., Melnyk, O. (2021) “Assessment of Potential Negative Impact of the System of Factors on the Ship’s Operational Condition During Transportation of Oversized and Heavy Cargoes”, *Transactions on Maritime Science*. Split, Croatia, 10(1). DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009.

**Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Vasalatii N.V., Koryakin K.S., Pulyaev I.O., Shcheniavskiy G.S.**  
**INFORMATIONAL INTERACTION TECHNOLOGIES IN THE PROCESS**  
**OF IMPROVING MARITIME SAFETY**

*Progressive implementation of information technologies aimed at the improvement of information exchange in the maritime transport sector is a complex task, which requires the integration of efforts both at the local and international level. Implementation of this concept allows to solve such problems as increasing of navigational safety and minimization of transport accidents and accidents, monitoring and control of transport flows, safety of human life, marine environment and resources, improvement of ship navigation safety standards. The development of reliable methods for evaluating the efficiency of information exchange technologies to support the process of ships navigation will enable the development of such technologies in other transport sectors. It has been researched that development of technical solutions to support e-Navigation also requires the development of methods to assess these solutions depending on the needs of users and to determine their effectiveness. The concept of e-Navigation offers integrated use of modern technologies to improve the efficiency of navigational and hydrographic and hydrometeorological safety of navigation, organization of search for ships and ships that are in distress, safety of navigation. This urgent task provides a comprehensive view on the use of technologies of information exchange and a possible way to develop a global system for ensuring the safety of life at sea, cargoes, objects of navigation in all environments, which perform any special task in the process of navigation. This article describes the importance of electronic navigation and its functional capabilities, which are based on a standard user interface and a unified control system, The system is designed to improve maritime safety by ensuring the reliability of marine telecommunications and reducing the number of accidents and damage to the marine environment.*

**Key words:** navigation safety, electronic navigation, marine telecommunication, information exchange process.

*Miedviedieva N.A.*

National Aviation University

## CONSEQUENCES OF COVID-19 AND WARS IN UKRAINE ON CHANGES IN THE ACTIVITIES OF AIR CARRIERS

*The article is devoted consequences of the pandemic COVID-19 and the War in Ukraine on air transport activities of world. The introduction of quarantine had significant negative consequences for the activities of transport market operators in world. The creation of serious restrictive measures included the complete cessation of passenger transportation by any transport, total ban on international flights has forced airlines to suspend operations. This situation has led to the cessation of travel planning by customers and the decline in operating performance of domestic transport operators (especially airlines) by almost 100%.*

*The Russian invasion of Ukraine and the effects of the deployment of the humanitarian crisis have stunned the world. This situation has affected aviation in many ways. In these extraordinary times, aviation companies are focused on refunds for canceled or changed travel plans. But the Federal Aviation Administration's prohibition on flying over Ukraine, Belarus and much of Russia requires some routes to make costly diversions. According to the changing situation, operators are forced to make adjustments to long routes, so an increase in the time and distance of flight, along with increasing fuel prices, which as a consequence, will have an impact on the aviation industry around the world. The countries European Union and US announced a restriction on all Russian flights. Owing to these restrictions, several passenger and cargo flights are being cancelled or rerouted, in addition, they suspended maintenance support to the Russian fleet.*

*The continuation of hostilities influenced the emergence in the airspace of Ukraine several reconnaissance aircraft, including Blackhawk helicopters, unmanned aerial vehicles, filling aircraft and large transport, air patrol fighters of NATO member states. The increase in oil prices affects all tickets, even on internal routes.*

**Key words:** air transportation, routes, COVID-19, war, airline, carrier.

**Formulation of the problem.** Ukraine has a favorable geographical location, which creates favorable conditions for participation in world shipping, development of international trade relations. Ukraine ranks first in Europe by transit (the transit coefficient of Ukraine – 3.75, Poland, which occupies the second place – 2.92).

The global situation related to the COVID-19 and especially, the Russian invasion of Ukraine contributed to the emergence of restrictions imposed by countries directly influenced the world aviation industry. The ban of Federal Aviation administration on the flights over Ukraine, Belarus and better part of Russia requires the change of routes.

**Analysis of recent research and publications.** The European Union Aviation Safety Agency (EASA) and European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC) at May 11, 2022 issued an update to the health safety measures for air travel, dropping the recommendation for mandatory wearing of medical masks in airports and on board a flight, while noting that a face mask is still one of the best protections against the transmission of COVID-19 [1].

Even more stringent measures were embodied as a result of the Russian invasion of Ukraine. The ban

on the Federal Aviation Administration [3] for flights over Ukraine, Belarus and for the most part of Russia requires changes in routes.

Even as operators are making constant adjustments to the rapidly changing situation, longer routes, increasing oil prices and increased flying time are expected to have an impact on the airline industry worldwide [4]. Aviation experts believe that the global aviation industry, which is barely recovering from the COVID-19 pandemic, will have an uphill task in dealing with the direct and indirect consequences of the Russian invasion of Ukraine, although its full impact is still not known [5].

**Formulation of article goals.** The main goal is to assess the influence of the pandemic of coronavirus and Russian invasion of Ukraine on the transport activities of world aviation.

**Presenting main material.** The update of the joint Aviation Health Safety Protocol takes account of the latest developments in the pandemic, in particular the levels of vaccination and naturally acquired immunity, and the accompanying lifting of restrictions in a growing number of European countries [1]. These recommendations include changes to masks, the relief of more stringent measures in air operations, which

will help improve the situation in the industry, while maintaining the appropriate measures. Vulnerable passengers should continue to wear a face mask regardless of the rules, ideally an FFP2/N95/KN95 type mask which has a higher level of protection than a standard surgical mask. Passengers, Airport staff and crew members should be alert and follow the recommendations and requirements of the national authorities of the region they are visiting.

Domestic recovery varies dependent on virus control COVID-19 variants are new source of uncertainty. Route planning – impact of Covid variants shows on the figure 1. Analyze searches worldwide for 'COVID-19', 'COVID variants' and 'Skyscanner' [6].

The Russian invasion of Ukraine and the effects of the deployment of the humanitarian crisis have stunned the world. This situation has affected aviation in many ways. First, it is helpful to understand pre-war Ukrainian and Russian traffic.

The Ukrainian airspace is closed, which is approximately 0.8% of the total movements by air around the world in accordance with 2021, and up to 3.3% of the total air passenger traffic in Europe.

Moldova has fully closed his airspace, while Belarus has prohibited flights over parts of his territory. These countries make up a small part of the regional and global air passenger traffic.

Russian domestic traffic accounts for 4.5% of global RPKs (revenue passenger kilometers) International air passengers between Russia and Europe accounted for 5.7% of total European traffic in 2021. Even though a relatively small portion of global traffic directly involved Russia or Ukraine, the war and associated sanctions have global implications for airlines and the work of IATA.

The European Union and US countries announced a restriction on all Russian flights, including own airspace for Russian aircraft. Russia responded to restrictions on the same, banning the flight over Russia. Earlier, the Rosaviatsiya – Aviation Agency recommended all Russian airlines with rented foreign-leased planes stop flights abroad. The consequences of this situation in the United States were canceled or redirected several passenger and cargo flights. The American company Boeing and European aviation conglomerate Airbus has already announced the suspension of support for maintenance of the Russian fleet. It is known that Aeroflot has a mixed fleet of Boeing and Airbus aircraft. The results of the analysis of carriers are affected by world sanctions and Covid are in Table 1.

The outbreak of war has meant the complete closure of air travel to/from/within Ukraine. And connectivity between Russia and the rest of the world has been dramatically reduced through airspace closures. This has presented a challenge to IATA's settlement systems, which process transactions between airlines and travel agents.

The IATA settlement systems normally facilitate the transfer of funds from ticket sales to airlines, but in these extraordinary times the focus is on processing refunds for cancelled or altered travel plans. This affects the customers of some 140 airlines participating in IATA's Russian BSP (Billing and Settlement Plan) as well as thousands of travel agents worldwide. Processing these refunds has been even more challenging due to sanctions.

IATA's settlement systems have also seen shifts in demand characteristics for countries neighboring Ukraine. While there has been a drop for inbound demand, there has been an uptick in bookings for

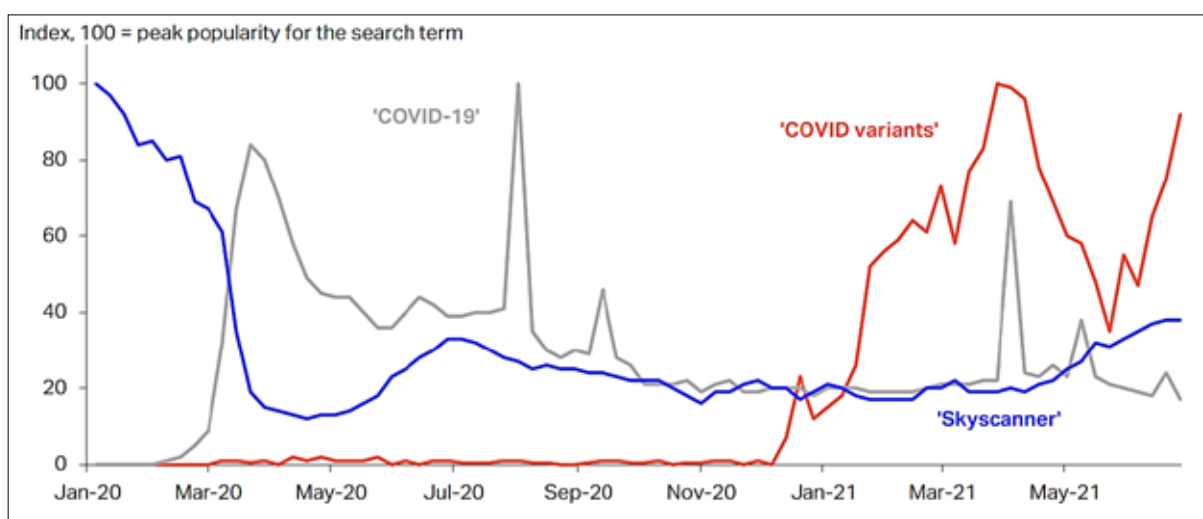


Fig. 1. Analyze searches worldwide for 'COVID-19', 'COVID variants' and 'Skyscanner'

Analysis of carriers are affected by world sanctions and Covid

Notable carriers impacted by Covid	Notable carriers impacted by Global sanctions
FlyBE (ceased operations in March 20) UK	Volgr-Depnr (Sanctioned in March 22) Russia
Virgin Australia (April 20) Australia	Aeroflot (Sanctioned in March 22) Russia
Alitalia (October 21) Italy	Rossiya Airlines (Sanctioned in March 22) Russia
Air Italy (April 20) Italy	S7 Airline (Sanctioned in March 22) Russia
Germanwings (April 20) Germany	Pobeda (Sanctioned in March 22) Russia
Compass Airline (April 20) USA	Ural Airlines (Sanctioned in March 22) Russia
TAME Ecuador (May 20) Ecuador	Utair (Sanctioned in March 22) Russia
LATAM Argentina (June 20) Argentina	
LEVEL Airlines (June 20) Spain	
AirAsia Japan (October 20) Japan	
Montenegro Airlines (December 20)	



Fig. 2. Analysis of in-and outbound travel in Ukraine’s neighbors

outbound flights as refugees move by air to locations farther afield. In the first weeks of the Russian’s invasion of Ukraine, airlines increased capacity out of these three countries by increasing frequencies larger aircraft onto these routes, fig. 2 [7]. Atlas Obscura said Romania, which borders Ukraine, was among the top-selling trips in the May.

IATA is working closely with authorities and airlines to share information so the changing routings can be well-coordinated. With current low levels of traffic that will need careful management as more of Asia re-opens to travel and volumes pick-up.

Finally, the war caused an increase in oil prices. As fuel is an airline’s largest variable cost, the absorbing such a massive price hike just as the industry is struggling to emerge from the two-year COVID-19 crisis is a huge challenge. If the oil price stays that high, then over time, it is reasonable to expect that it will be reflected in airline yields. Result of increase in oil prices shows in the Table 2.

The negative consequences of the war are obviously major within the EU itself, since we are had economic ties with both Ukraine and Russia. It also brings with it in the EU a flow of refugees. The shock waves are reaching more and more countries and sectors.

Table 2

Oil and fuel price

US\$/barrel (period ave.)	2021	Dec-21	Jan-22	Feb-22	Mar-22
Crude oil (Brent)	70.9	74.7	85.6	94.3	96.186
Jet fuel	77.7	87.1	100.9	110.0	112.2

After introducing restrictions and bans, American airlines, such as UA, for complete their flights between New Deli and Chicago, accepted another route through Western Europe had to avoid using a regular route through Russia.

As there are no direct restrictions between India and Russia the Air India flights between New Deli and

Table 3

## Europe Top 5 carriers by flights

Rank	Airline Group	Flights on 22 May 2022	Flights on 26th May 2019
1	FR Group	2,909	2,522
2	easyJet Group	1,658	1,857
3	Turkish Airlines	1,382	1,341
4	Lufthansa Airlines	1,273	1,515
5	Air France Group	1,028	1,172
<b>Top 5 total flights</b>		<b>8,250</b>	<b>8,407</b>
<b>% of total EuroC flights</b>		<b>30 %</b>	<b>27 %</b>

Chicago airports continue to operate through Russian airspace. This is one of the several instances, even in regions far away from the war, of how the Russian invasion of Ukraine is going to affect the aviation transportations. The Indian government to evacuate thousands of Indian citizens from Ukraine through neighboring countries has deployed multiple passengers as well as Air Force transport, jets such as C-17.

For evacuate citizens who have been crossing the borders from Ukraine have been directed numerous special flights are being operated by many countries to Poland and Romania.

Most passenger flights between Europe and Eastern or Southeastern Asia overfly Russia as a simple function of geography. London to Tokyo, for example, is around an 11- to 12-hour flight, usually overflying Russia and the Nordic countries.

The first option for airlines avoiding Russia is flying south, skirting the Black Sea and the Caucasus before flying over central Asia. This would be a slightly modified, post-Soviet version of the London-India-Hong Kong routes flown during the Cold War. The second option is to fly north, over Greenland and far northern Canada to Alaska and the Bering Strait, avoiding eastern Russia.

While operators continue to make adjustments according to the changing situation, increased flying time, longer routes along with rising fuel prices are expected to have an impact on the aviation industry worldwide. The Number of Flights on May 22, 2022 on Airline Group is shown in table 3.

At this time, travel companies do not see mass cancellations flights as travelers, since travelers adhere to their resolve in the realization of own plans when fulfilling the recommendation from the pandemic. Nearly 65 percent of American adults surveyed by TheVacationer.com, a travel strategy website, said

they would accept higher prices, longer transit times or another deterrent in order to travel in 2022.

Data of monitoring of Flightradar24 was paid attention on some interesting changes in the airspace of the NATO member countries that bordering Ukraine. Can be seen several flights operating in a recurring flight pattern, near to the western borders of Ukraine. The cause of the situation is air patrols near Ukrainian borders, another reason for such models may be a growing number of aircraft at the airports of neighboring countries.

On the open-source flight tracking platform for the past few days have been seen over several reconnaissance aircraft, Blackhawk helicopters, Unmanned Aerial Vehicles, large transport and refuelling aircraft including fighter jets.

Most aviation experts believe that the global aviation industry is restored after the COVID-19 pandemic by the implementation of quarantine measures, and the consequences of the Russian invasion of Ukraine are completely unknown, although this already affects on the price of a passenger and freight transportation and accordingly on the price of the goods.

**Conclusions.** According to the study, the influence of the COVID-19 pandemic had significant negative consequences for the activities of the transport market operators in the world. The realization of quarantine measures made it possible to get out of the crisis by aviation companies. Due to the Russian invasion of Ukraine ban for flights were implemented over Ukraine, Belarus and Russia, to receive sides of the airlines of Russia, as well as refusal to support maintenance to the Russian fleet. The consequences of this ban is a change in the routes of aircraft, as a result, an increase in the range and flight time, increasing the cost of flights. In addition, there were refunds of money due to the cancellation or altered plans to travel citizens of different countries.

## References:

1. COVID-19 Aviation Health Safety Protocol. Operational guidelines for the management of air passengers and aviation personnel in relation to the COVID-19 pandemic. 2022. № 04. 21 pp.
2. Airlines see no major route impact from Ukraine crisis. URL: <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/airlines-see-no-major-route-impact-ukraine-crisis-2022-01-25>. (дата звернення: 23.06.2022)

3. Russia-Ukraine war news: Making sense of changing flight patterns over eastern Europe. URL: <https://www.indiatoday.in/world/russia-ukraine-war/story/russia-ukraine-war-news-making-sense-of-changing-flight-patterns-over-eastern-europe-1921260-2022-03-06> (дата звернення: 23.06.2022)
4. IATA Factsheet. The impact of the war in Ukraine on the aviation industry. URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-impact-of-the-conflict-between-russia-and-ukraine-on-aviation/> (дата звернення: 24.06.2022)
5. IATA Economics using Google Trends. URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-travel-update-optimism-with-caution/> (дата звернення: 24.06.2022)
6. IATA Economics' Chart of the Week. Imbalance of in-and outbound travel in Ukraine's neighbors, 8 April 2022. URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/imbalance-of-in-and-outbound-travel-in-ukraines-neighbors/> (дата звернення: 24.06.2022)

### **Мєдведєва Н.А. НАСЛІДКИ COVID-19 ТА ВІЙНИ В УКРАЇНІ НА ЗМІНИ У ДІЯЛЬНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПЕРЕВІЗНИКІВ**

*Стаття присвячена наслідкам пандемії COVID-19 та війни в Україні на повітряний транспорт світу. Впровадження карантину мало значні негативні наслідки для діяльності операторів транспортного ринку у світі. Створення серйозних обмежувальних заходів включало повне припинення пасажирського транспорту будь-яким транспортом, загальна заборона на міжнародні рейси змусила авіакомпанії призупинити операції. Ця ситуація призвела до припинення планування подорожей з боку клієнтів та зниження операційних показників домашніх транспортних операторів (особливо авіакомпаній).*

*Російське вторгнення в Україну і, як наслідок, розгортаюча гуманітарна криза приголомшили світ. Війна в Україні вплинула на авіацію у багатьох відношеннях. У ці надзвичайні часи зосереджено на обробці коштів для скасування або змінених планів подорожей. Заборона Федеральної авіаційної адміністрації на польоти над Україною, Білоруссю та здебільшого Росії потребує деяких маршрутів, щоб зробити відгалуження. У той час як оператори продовжують вносити корективи відповідно до ситуації, що змінюється, більш довгими маршрутами, збільшення часу польоту поряд із зростанням цін на паливо вплине на авіаційну галузь у всьому світі. Країни Європейського Союзу та США оголосили про обмеження на всі російські рейси. Через ці обмеження кілька пасажирських та вантажних рейсів скасовуються або перенаправляються, крім того призупинили у підтримці технічного обслуговування російському флоту.*

*Продовження військових дій вплинуло на появу у повітряному просторі країн-членів НАТО, що межують з Україною, декілька розвідувальних літаків, вертольотів Blackhawk, безпілотних літальних апаратів, великих транспортних та заправних літаків, а також винищувачів для повітряного патрулювання. Підвищення ціни на нафту впливає на всі ціни на авіаквитки, навіть на внутрішніх маршрутах.*

**Ключові слова:** повітряний транспорт, маршрути, COVID-19, війна, авіакомпанія, перевізник.



УДК 656.021

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/41>**Стрелко О.Г.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Торопов Б.І.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Грушевська Т.М.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Войцехович В.С.**

Інститут фізики Національної академії наук України

**Поповичук Т.О.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ НА ПРОПУСКНУ СПРОМОЖНІСТЬ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛІВ

У статті розглянуто пасажиропотоки і закономірності їх формування в транспортно-пересадочних вузлах і пасажирських комплексах для визначення раціональних шляхів їх розвитку і функціонування. Оскільки пасажиропотік є визначальним фактором при виборі рухомого складу, інтервалів руху поїздів та інших параметрів, запропоновано основні напрямки підвищення ефективності функціонування і розвитку пасажирських комплексів. Проаналізовано критерії, які характеризують пасажиропотоки вокзальних комплексів і визначають закономірність їх формування. Обґрунтовано необхідність і визначено роль транспортно-пересадочних комплексів у розвитку транспортної системи країни та у забезпеченні її населення в транспортному обслуговуванні, виконуваному на сучасному рівні, в межах міст, у приміських зонах та на далеких відстанях. Крім того, неузгодженість розкладу провокує збільшення часу очікування пасажирів під час пересадки та втому пасажирів, що значно знижує привабливість громадського транспорту для населення. Транспортні розв'язки загального користування є важливою частиною транспортної інфраструктури та складною технологічною системою, де відбуваються процеси обслуговування пасажирів і взаємодія різних видів громадського транспорту. В умовах сьогодення, у статті запропоновано необхідність забезпечення сталого розвитку транспортно-пересадочних комплексів у покращенні транспортної системи країни та у забезпеченні її населення в транспортному обслуговуванні, шляхом зосередження зусиль на вдосконаленні та взаємодії різних видів транспорту й впровадженні інноваційних технологій щодо надання якісних послуг пасажиром. Основним завданням створення стійкого розвитку транспортних систем є покращення роботи пасажирського транспорту, який має стати конкурентоспроможною альтернативою приватним автомобілям, забезпечення транспортного обслуговування на високому рівні.

**Ключові слова:** транспортно-пересадочний вузол, пасажирські перевезення, пропускна спроможність, пасажиропотоки, комфорт поїздки, транспортний сервіс.

**Постановка проблеми.** Пасажирські перевезення – це складна динамічна система, яка складається з різноманітних підсистем (елементів), що взаємодіють між собою, з різними галузевими службами та іншими видами транспорту в єдиному системному процесі масових перевезень населення. В нинішніх умовах транспортна інфраструктура країни потребує оновлення, для чого потрібно удосконалення транспортно-пересадочних вузлів, вокзалів та рухомого складу, необ-

хідно здійснити капітальні вкладення в технічну і технологічну складову пасажирських перевезень. Транспортна система України поступово переходить на європейську модель розділення сфер діяльності з управління інфраструктурою та з надання транспортних послуг. У зв'язку з цим виділяються [1, с. 7–11]: оператор інфраструктури (менеджер інфраструктури), уповноважений надавати до неї рівноправний доступ усім перевізникам; оператори перевезень (перевізники

пасажирів, провайдери транспортних послуг); користувачі транспортних послуг – пасажирів різних категорій [2, с. 280].

Функціонування та взаємодія різних видів транспорту спрямована на забезпечення зв'язків між регіонами країни, у зв'язку з цим зростання пасажиропотоків вимагає вирішення задачі перевірки технічних і технологічних параметрів дільниць, транспортно-пересадочних вузлів, вокзалів та рухомого складу на можливість ефективної організації пасажиропотоків. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення конкурентоспроможності пасажирських перевезень шляхом надання більш якісних транспортних послуг за рахунок удосконалення технологічного та організаційного забезпечення цих перевезень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В зарубіжних країнах, як і в нашій країні, існує жорстка конкуренція між різними видами пасажирського транспорту. Характерною особливістю роботи приміського залізничного транспорту в сучасних умовах у всіх країнах світу є його активна участь у внутрішньоміських перевезеннях. В останні роки існуючі міські залізниці в багатьох великих містах світу інтенсивно розвиваються, модернізуються, забезпечуються новим комфортабельним рухомим складом. Проте все частіше з'являються наукові публікації щодо взаємодії різних видів транспорту в пересадочних вузлах.

Питанням створення, розвитку та різним аспектам функціонування транспортно-пересадочних вузлів нині присвячено вже багато наукових праць, але переважно іноземних дослідників [3, с. 60]. Так в роботі [5] автори досліджують та проводять порівняльний аналіз різних моделей розвитку залізничної транспортної інфраструктури в системі мультимодальних пасажирських перевезень. У статті [6] автор досліджує оптимальні моделі побудови та експлуатації мультимодального транспорту.

У роботі [7, с. 50] розглянуто ефективність функціонування транспортно-пересадочних вузлів з позицій впливу ресурсного забезпечення зупиночних пунктів на тривалість знаходження пасажирів в них. У статті [8, с. 97–102] наводяться результати визначення рівня інтенсивності потоку автобусів міського пасажирського транспорту при заданій пропускній спроможності зупиночного пункту. Як критерій оцінки рівня інтенсивності руху автобусів для зупиночних пунктів без впливу регульованих перетинів запропоновано використовувати середній час очікування черги.

Певний науковий інтерес являють собою праці учених [9], які пропонують удосконалити технологію мультимодальних залізничних пасажирських перевезень за участю автотранспорту шляхом узгодження графіку руху всіх видів транспорту. Узгодження графіку здійснено в умовах транспортно-пересадочного вузла з використанням моделювання пасажиропотоків в процесі взаємодії різних видів транспорту.

Вокзальні комплекси на залізничному та інших видах транспорту часто перетворюються на багатofункціональні транспортно-пересадочні вузли, які забезпечують зручну та безпечну пересадку пасажирів [9]. Це дозволить враховувати особливості мультимодальної технології перевезення пасажирів [10], шляхом узгодження руху пасажирських транспортних засобів.

За результатами досліджень цих учених вибудовуються певні корисні ідеї, які використовуємо за основу при взаємодії різних видів пасажирського транспорту в транспортних вузлах.

Надання сучасних сервісних послуг пасажирів, створення єдиного інформаційного середовища, узгодження графіку руху транспортних засобів, продаж єдиних проїзних документів є пріоритетними напрямками у сфері пасажирських перевезень. У складних транспортних мережах за неузгодженої роботи перевізників пересадка з одного виду транспорту на інший завдає пасажирів велику кількість незручностей: оформлення різних проїзних документів, складність оформлення багажу та його переміщення між транспортними засобами, що призводить до збільшення витрат часу на поїздку [9, 10]. Окремі перевізники та види транспорту не можуть забезпечити високого ступеня мобільності населення та надати високоякісну систему задоволення потреб населення в перевезеннях «від дверей до дверей». Це відбувається в силу специфіки розміщення інфраструктури, особливостей технологічних процесів кожного виду транспорту, відмінностей у роботі та в технології обслуговування транспортних засобів. Скорочення часу перебування пасажира під час поїздки та в процесі пересадок може бути досягнуто за рахунок використання декількох видів транспорту, тому необхідно створити передумови високоякісної системи перевезень декількома видами транспорту за логістичною технологією мультимодального пасажирського перевезення. Високий рівень якості транспортних послуг є запорукою, перш за все, безпеки перевезень, надійності, задоволеності попиту пасажирів [11, с. 42].

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є дослідження впливу пасажиропотоків на пропускну спроможність транспортно-пересадочних вузлів та побудова оптимальної моделі взаємодії існуючих та потенційних учасників ринку перевезень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У сучасних умовах переважна більшість пасажирських перевезень здійснюється з участю двох і більше видів транспорту. Процеси взаємодії, зазвичай, відбуваються у транспортних вузлах. Принципова схема пасажиропотоків крупної пасажирської станції наведена на рис. 1.

У великих транспортних вузлах близько 90% пасажирів, що прибувають до міста залізничним транспортом, пересідає на міський транспорт. На даний час, у багатьох випадках перехід пасажирських потоків з одного виду транспорту на інший у вузлах пересадки супроводжується великими втратами часу.

Основною причиною втрат часу пасажирями є недостатня взаємодія та відомча роз'єднаність пасажирських видів транспорту і відсутність ефективно функціонуючого координаційного органу управління, насамперед, на стадії проектування нових та реконструкції існуючих транспортних вузлів. Це ускладнює проведення єдиної техніко-економічної та соціальної політики щодо створення та реконструкції транспортних вузлів з точки зору ефективної взаємодії в них різних видів пасажирського транспорту.

Транспортні вузли, що обслуговують населення міста (району) можуть бути віднесені до

одного із шести класів залежно від прийнятої схеми обслуговування

1 клас – обслуговування здійснюється метрополітеном та всіма наземними видами транспорту;

2–3 клас – трамваєм, тролейбусом, автобусом та приміськими поїздами;

4 клас – трамваєм та автобусом;

5–6 клас – лише автобусом.

Технічні можливості різних видів пасажирського транспорту, їх провізні спроможності з урахуванням надійності роботи пристроїв, наведені у таблиці 1.

У сучасних умовах особливого значення набуває вдосконалення технологічної взаємодії різних видів пасажирського транспорту в транспортних вузлах, яке можливе на основі: більш повного використання досягнень розвитку інформаційної техніки та єдиної системи управління всіма видами транспорту; єдиних термінів обстеження пасажиропотоків на взаємодіючих видах транспорту; узгоджених розкладів руху; використання ефекту великих систем (розширення можливостей маневрування рухомим складом, ремонтною базою, робочою силою тощо); оптимального поєднання (за кількістю і часткою транспортної роботи) взаємодіючих видів транспорту, оптимальних структур та чисельності парків окремих видів транспорту, єдиного тарифу, що забезпечує право пересадки в межах міста на будь-який вид транспорту.

Вибір технологічної схеми взаємодії різних видів транспорту у містах та визначення потреби у рухомому складі за видами транспорту може

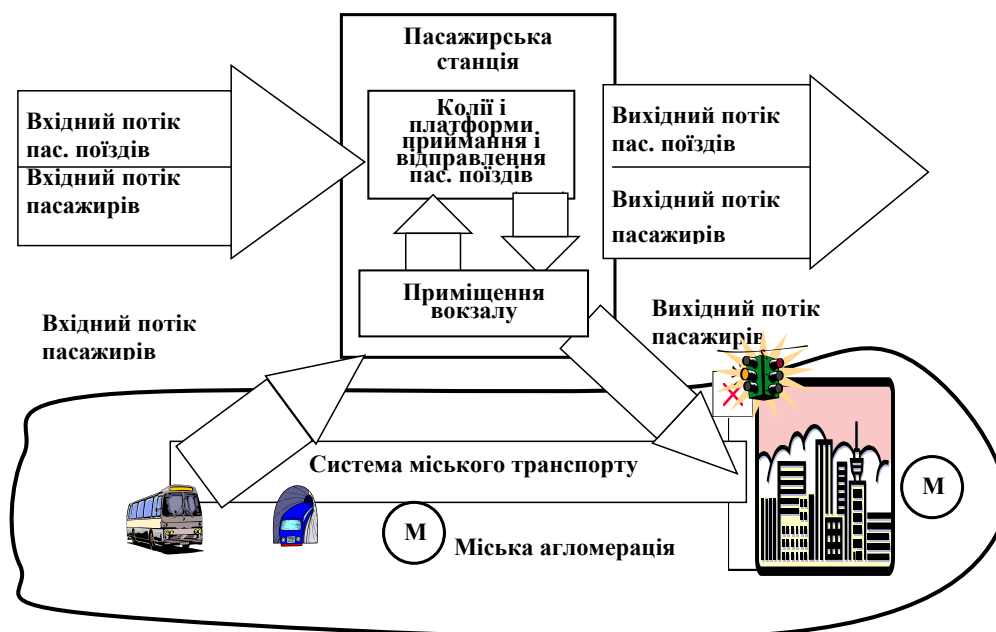


Рис. 1. Принципова схема пасажиропотоків крупної пасажирської станції

Технічні можливості різних видів пасажирського транспорту, їх провізні спроможності з урахуванням надійності роботи пристроїв

Найменування показника	Вид транспорту					
	Метрополітен	Трамвай		Тролейбус	Автобус	Залізничний (електропоїзд)
		швидкісний	звичайний			
Середня швидкість повідомлення у місті, км/год	35–50	25–40	16–23	18–22	16–23	40–50
Середня швидкість сполучення на стиках міста з передмістям	45–50	35–50	30–35	–	25–30	40–50
Місткість рухомого складу, осіб, при кількості вагонів						
один	–	–	100	80	50–80	–
два	–	200	200	130	100	–
шість	норма 3 особи на 1 м <sup>2</sup> вільної площі	720	–	–	–	–
вісім	підлоги	960	–	–	–	–
десять		–	–	–	–	1600
Реалізована провізна спроможність в одному напрямку, тис. пасажирів на годину	30–42	10–15	5–12	4–6	6–8	48–50

бути виконано за допомогою економіко-математичних методів. При цьому передбачається можливість комплексного розвитку пасажирських станцій, привокзальних площ та міських магістралей з дотриманням умови

$$N_{ст} \leq N_{п.пл} \leq N_{вул}, \quad (1)$$

де  $N_{ст}$ ,  $N_{п.пл}$ ,  $N_{вул}$  – пропускна спроможність пасажирської станції, привокзальної площі, прилеглих вулиць.

В існуючих містах на відміну від тих, що будуються, взаємозв'язок  $N_{ст}$ ,  $N_{п.пл}$  і  $N_{вул}$ , більш складніший. Залежності наведено на рис. 2.

Кількість пасажирів в годину «пік» осіб

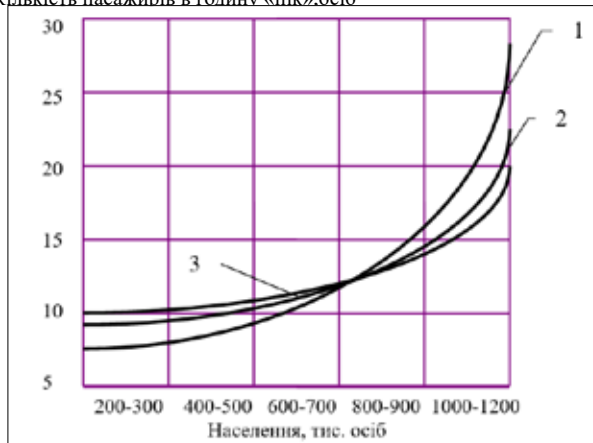


Рис. 2. Залежність пропускної спроможності основних елементів пасажирського транспортного вузла від населеності обстежених міст

1 – пасажирська станція та вокзальний комплекс;  
2 – площа; 3 – вулиці

Залежності відображають явну неузгодженість розвитку пристроїв залізниці та міського транспорту і показують, що в містах з населенням менше 750 тис. осіб лімітуючим елементом є пасажирська станція з вокзальним комплексом. Привокзальна площа та прилеглі вулиці мають певний резерв пропускної спроможності при населенні міст до 700 тис. осіб; у містах із населенням понад 900 тис. осіб лімітуючим елементом стають привокзальна площа та вулиці.

Кількість пасажирів, які прибувають протягом розрахункового періоду на пасажирську станцію, визначається за формулою

$$N_{ст} = \sum_{n=1}^{n=N_{шт}} \frac{na(T_p - t_{пост}) \overline{N_{пас}}}{t_{зан} (1 + t_{\gamma_n})^2}, \quad (2)$$

де  $a$  – кількість поїздів, що обслуговуються пасажирською платформою одночасно;

$T_p$  – тривалість розрахункового періоду, година;

$t_{пост}$  – сумарний час зайняття платформи виконанням операцій, не пов'язаних з обслуговуванням пасажирів (пропуск локомотивів, вантажних поїздів, ремонтні роботи, прибирання та ін.), година;

$\overline{N_{пас}}$  – середня кількість пасажирів, що прибувають одним поїздом;

$t_{зан}$  – середньозважена тривалість заняття перонної колії пасажирським поїздом, ч.;

$t_{\gamma}$  – число нормованих відхилень, що визначається залежно від прийнятого рівня довірчої ймовірності,  $t_{\gamma} = 1,65$ ;

$\gamma_n$  – коефіцієнт варіації часу заняття перонної колії, що дорівнює 0,3–0,5;

$\beta_n$  – коефіцієнт, що враховує відмови технічних пристроїв,  $\beta_n = 0,01$ .

Загальна кількість пасажирів, що вивозяться з привокзальної площі в розрахунковий період, залежить від кількості пунктів зупинки міського транспорту на привокзальній площі та їх пропускної спроможності

$$N_{\text{міськ}} = \overline{N}_{\text{авт}} m_a z_a + \overline{N}_T m_T z_T + \overline{N}_{\text{тр}} m_{\text{тр}} z_{\text{тр}} + \overline{N}_m z_m, \quad (3)$$

де  $\overline{N}_{\text{авт}}$ ,  $\overline{N}_T$ ,  $\overline{N}_{\text{тр}}$  – кількість пасажирів, що вивозяться відповідно одним автобусом, тролейбусом та трамваєм;

$\overline{N}_m$  – середня місткість одного складу метро;

$m_a$ ,  $m_T$ ,  $m_{\text{тр}}$  – відповідно кількість зупинних пунктів автобуса, тролейбуса, трамвая, розташованих на привокзальній площі;

$z_a$ ,  $z_T$ ,  $z_{\text{тр}}$ ,  $z_m$  – пропускна спроможність одного зупинного пункту (станції метро) відповідного виду транспорту за розрахунковий період.

Пропускна спроможність зупинного пункту на привокзальній площі дорівнює

$$z_j = \frac{3600T_p}{T_{c_j} + \ddot{A}_j + r_j}, \quad (4)$$

де  $T_{c_j}$  – середня тривалість стоянки  $j$ -го виду транспорту при посадці та висадці пасажирів, с;

$\tau_j$  – середні витрати часу на прискорення при пуску та уповільненні на гальмування, с;

$r_j$  – додатковий проміжок часу (2–3 с), необхідний для під'їзду до зупинного пункту.

Якщо інтервал прибуття машин на площу перевищує сумарний час, необхідний транспортній одиниці на всі види операцій, пов'язаних з посадкою та висадкою пасажирів, то пропускна спроможність зупинного пункту скоротиться і дорівнюватиме

$$z_j = \frac{3600T_p}{I_p}, \quad (5)$$

де  $I_p$  – розрахунковий інтервал прибуття транспортних одиниць до зупинного пункту.

$$I_p = \frac{I_{\text{мін}} + I}{2}, \quad (6)$$

де  $I_{\text{мін}}$  – відповідно мінімальний та середній інтервали прибуття транспортних одиниць до зупинного пункту.

Величина мінімального інтервалу залежить від типу площі та вулиць, що примикають до неї, загальних розмірів руху міського транспорту та інших факторів. За відсутності затримок транспорту на найближчому перехресті величина  $I_{\text{мін}}$

для кінцевих площ визначається умовою безпечного руху один за одним двох одиниць міського транспорту.

$$I_{\text{мін}} = t_p + \frac{v}{2b} + \frac{l + l_3}{v}, \quad (7)$$

де  $t_p$  – час реакції водія;

$v$  – швидкість руху на підході до площі, м/с;

$b$  – прискорення уповільнення при гальмуванні м/с<sup>2</sup>;

$l$  – довжина транспортної одиниці, м;

$l_3$  – проміжок безпеки, м.

Пропускна спроможність станції метрополітену за розрахунковий період  $T_p$ .

$$z_m = \frac{3600T_p}{I_p}, \quad (8)$$

де  $I_p$  – розрахунковий інтервал руху поїздів на лінії метрополітену.

Для забезпечення нормального режиму роботи міських видів транспорту та забезпечення максимальних зручностей для пасажирів необхідно забезпечити рівність пропускної спроможності пасажирської станції ( $N_{\text{ст}}$ ) та привокзальної площі ( $N_{\text{пр.пл}}$ ) та зупиночних пунктів.

Необхідна кількість пунктів зупинки буде рівна

$$m = (N_{\text{ст}} - \overline{N}_m) \left( \frac{\alpha_a}{N_a z_a} + \frac{\alpha_T}{N_T z_T} + \frac{\alpha_{\text{тр}}}{N_{\text{тр}} z_{\text{тр}}} \right), \quad (9)$$

де  $\alpha_a$ ,  $\alpha_T$ ,  $\alpha_{\text{тр}}$  – частка пасажирів, які користуються відповідно автобусом, тролейбусом та трамваєм;

$\overline{N}_m$  – середня кількість пасажирів, які зробили пересадку на метро.

Для встановлення нормального режиму взаємодії залізничного та міських видів транспорту на привокзальній площі слід перевіряти відповідність пропускної спроможності площі та виходів, що примикають до неї, на міські магістралі або лімітуючі перехрестя,

У транспортних вузлах (особливо великих міст) здійснюється взаємодія швидкісних та звичайних наземних видів транспорту:

– традиційний транспорт служить технологічним продовженням швидкісного. Технологічна взаємодія досягається узгодженням розкладів руху;

– автобус, тролейбус виконують функції видів транспорту, що підвозять до швидкісних, які обслуговують напрямки з потужними пасажиропотоками. Взаємодія забезпечується узгодженням розкладів та раціональним розміщенням зупиночних пунктів;

– звичайні та швидкісні види транспорту на напрямках з яскраво вираженою просторовою нерівномірністю пасажиропотоків працюють паралельно. Взаємодія виявляється у встановленні оптимальних маршрутних схем;

– швидкісний транспорт є технологічним продовженням ліній замських залізниць. Взаємодія проявляється в оптимізації кількості, розміщення та планування станцій пересадки, узгодження пропускної спроможності окремих елементів та ув'язування розкладів руху.

#### Висновки

Одним із найкращих шляхів підвищення ефективності громадського транспорту є удосконалення функціонування транспортних розв'язок загального користування та формування на їх основі інтермодального транспорту і мультимодальних пасажирських транспортних систем, які можуть забезпечити «плавну подорож».

Процеси урбанізації, що розвиваються, призводять до того, що у великих містах промислових районів концентрується значна частина населення. Подібна концентрація має ряд переваг щодо організації транспортного обслуговування населення, однак, з іншого боку, виникають і значні складнощі у взаємодії різних видів транспорту та взаємопов'язаних об'єктів, що входять до складу пасажирських комплексів (вокзали, привокзальні площі, транспортно – пересадочні вузли тощо), що групуються навколо найважливіших транспортних вузлів. Взаємодія проявляється в раціоналізації числа розміщення та плануванні станцій пересадки, узгодженні пропускної спроможності окремих елементів та ув'язуванні розкладів руху.

Одним з найважливіших питань раціоналізації процесів взаємодії залізниць та міських видів транспорту є комплексний розвиток та розміщення станцій пересадки та транспортно – пересадочних вузлів.

#### Список літератури:

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року (НТС 2030): Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430–р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p>. (дата звернення 24.06.2022).
2. Поздняков А. А., Мироненко В.К., Позднякова О.О. Інформаційна модель розвитку залізничної транспортної інфраструктури в системі мультимодальних пасажирських перевезень. *Наукоємні технології*. 2019. № 2 (42). С. 280–287.
3. Мельник, Т., Христофор, О., Красноштан, О. (2021). Роль транспортно-пересадочних комплексів у розвитку транспортної системи країни: соціальний і сервісний аспекти. *Review of transport economics and management*, 5 (21), 59–69. DOI: <https://doi.org/10.15802/rtem2021/224970>
4. Vdovychenko V. Analysis of the resources provision of stopping points of transport-transfer stations of urban passenger transport. *Інформаційно-керуючі системи: Технологічний аудит та резерви виробництва*. № 2/2(40), 2018. DOI:10.15587/2312-8372.2018.129152.
5. Ivaldi M., McCullough G. J. Subadditivity Tests for Network Separation with an Application to U.S. Railroads. 01-May-2004. DOI:10.2139/ssrn.528542 (eng).
6. Hammadi S. Ksouri M. Multimodal Transport Systems. *WILEY*. 2014. 278 p. DOI:10.1002/9781118577202 (eng).
7. V. Naumov, G. Samchuk Public transport interchanges functioning from a sustainable development perspective. *Автомобільний транспорт*. Вип. 37. 2015. p. 49–54.
8. Lipenkov A. V., Kuzmin N. A. Opredelenie dopustimogo urovnya intensivnosti dvizheniya gorodskikh avtobusov pri izvestnoy propusknoy sposobnosti ostanovochного пункта. *Intellect. Innovatsii. Investitsii*. 2015. Vol. 3. P. 97–102.
9. Ломотько Д. В., Філіпський О. В., Кравченко Д. М. Удосконалення роботи транспортно-пересадочних вузлів під час мультимодальних пасажирських перевезень за участю залізниць та автотранспорту. *Наукові праці ВНТУ*. Лис. 2019, № 4. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2019-4-50-61>.
10. Ломотько Д. В., Листопад М. С., Воскобойников Д. Г. [та ін.]. Шляхи удосконалення технології мультимодальних швидкісних пасажирських перевезень. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2017. № 13. С. 59–66. DOI:10.15802/tstt2017/110770.
11. Габа В.В., Грушевська Т.М., Костюшко В.П. Адаптивна система організації пасажирських перевезень у транспортному вузлі. *Прогресивні технології засобів транспорту* : матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. Харків-Миргород : УкрДУЗТ, 2021. С. 41–42.

---

**Strelko O.H., Toropov B.I., Hrushevska T.M., Voitshovich V.S., Popovychuk T.O.**  
**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF PASSENGER FLOWS**  
**ON THE CAPACITY OF TRANSFER NODES**

*The article examines passenger flows and patterns of their formation in transport interchanges and passenger complexes in order to determine rational ways of their development and functioning. Since the passenger flow is a determining factor in the selection of rolling stock, train movement intervals and other parameters, the main directions for increasing the efficiency of the functioning and development of passenger complexes are proposed. The criteria that characterize passenger flows of station complexes and determine the regularity of their formation are analyzed. The necessity and role of transport and transfer complexes in the development of the country's transport system and in providing its population with transport services performed at a modern level within cities, in suburban areas and over long distances is substantiated. In addition, the inconsistency of the schedule provokes an increase in the waiting time of passengers during transfers and passenger fatigue, which significantly reduces the attractiveness of public transport for the population. Public transport junctions are an important part of the transport infrastructure and a complex technological system where passenger service processes and interaction of different types of public transport take place. In today's conditions, the article proposes the need to ensure the sustainable development of transport and transfer complexes in improving the country's transport system and providing its population with transport services, by focusing efforts on the improvement and interaction of various types of transport and the introduction of innovative technologies to provide quality services to passengers. The main task of creating a sustainable development of transport systems is to improve the performance of passenger transport, which should become a competitive alternative to private cars, and to provide transport services at a high level.*

**Key words:** *transport interchange, passenger transportation, capacity, passenger flows, travel comfort, transport service.*

**Фалович Н.М.**

Західноукраїнський національний університет

**Фалович В.А.**

Західноукраїнський національний університет

**Шевчук О.С.**

Західноукраїнський національний університет

**Попович П.В.**

Західноукраїнський національний університет

**Чорна О.В.**

Західноукраїнський національний університет

## ДЕРЖАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

*Автомобільний транспорт є однією з важливих галузей національної економіки, який забезпечує захист економічних інтересів держави, обороноздатність, підвищення рівня життя населення та впливу різних екологічних факторів на стан навколишнього середовища. Саме тому вдосконалення державного регулювання автотранспортного забезпечення у сфері перевезень є дуже актуальним, оскільки, вирішення цієї проблеми є важливе для інтегрування транспортної системи України в транспортні системи Європи, Азії та Балтійського й Чорноморського регіонів. З цією метою Україні варто перейняти досвід Європейського союзу з стягування оплати за користування транспортною інфраструктурою задля відновлення екологічного балансу та відшкодування заподіяної транспортом шкоди навколишньому середовищу.*

*З огляду на те, що Україна є транзитною країною, нова транспортна стратегія пропонує використати її транспортний потенціал, створити конкурентоспроможну систему транспортно-обслуговування та забезпечити ефективну організацію транспортно-дорожнього комплексу країни. Зокрема, у сфері пасажирських перевезень перспективою є запровадження електронного квитка, розвиток нових міжрегіональних та міжнародних швидкісних сполучень, оновлення міських транспортних інфраструктур, залучення додаткових інвестицій для забезпечення сталого розвитку міського транспорту, заміна застарілих стандартів у галузі транспортних технологій.*

*Стратегія передбачає створення в Україні ефективного транспортного комплексу, який буде інтегрований у європейську та світову транспортні мережі, задля гарантування потреб населення у переміщенні та підвищення конкурентоспроможності національної економіки. Такий комплекс повинен забезпечити розвиток транспортної інфраструктури відповідно до європейських стандартів, підвищити безпеку переміщень та мінімізувати негативний вплив на довкілля. Також дана Стратегія покликана відповідно реагувати на потребу у вдосконаленні управління на транспорті, адміністративної реформи та децентралізації управління, антикорупційної політики, корпоративного управління в державному секторі.*

**Ключові слова:** *автомобільний транспорт, транспортна стратегія, екологічна складова, екологічна безпека, державне регулювання.*

**Постановка проблеми.** Автомобільний транспорт є однією з важливих галузей національної економіки, який забезпечує захист економічних інтересів держави, обороноздатність, підвищення рівня життя населення та впливу різних екологічних факторів на стан навколишнього середовища [1].

Саме тому вдосконалення державного регулювання автотранспортного забезпечення у сфері перевезень є дуже актуальним, оскільки, вирішення цієї проблеми є важливе для інтегрування транспортної системи України в транспортні системи Європи, Азії та Балтійського й Чорноморського регіонів. З цією метою Україні варто



переїняти досвід Європейського союзу з стягування оплати за користування транспортною інфраструктурою задля відновлення екологічного балансу та відшкодування заподіяної транспортом шкоди навколишньому середовищу.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Важливе значення у дослідженні проблеми правового регулювання автотранспортних перевезень мають наукові праці вітчизняних вчених, зокрема О.Ю. Рудченко [1], О.М. Поліщук [2], Ю.В. Дзядикевич [3], П.В. Попович [4], Н.І. Богомолова [5].

В роботі О.Ю. Рудченка [1] розглядається економічну суть та особливості формування механізму державного регулювання розвитку транспортної інфраструктури мегаполісів, а також окреслює напрями його вдосконалення в контексті інноваційних перетворень у транспортній сфері.

О.М. Поліщук [2] досліджує проблеми управління транспортними потоками великих міст та пропонує інноваційні інструменти для впровадження на транспорті.

Ю.В. Дзядикевич [3] у своїх дослідженнях висвітлює особливості державного регулювання автоперевезень в Україні, зокрема, зазначає, що «основними принципами нової політики діяльності АТС повинні бути: приватизація на транспорті, демонополізація, розвиток конкурентного середовища та спрощення процедур перетину кордону та інші заходи».

П.В. Попович [4] аналізує особливості функціонування ринку транспортних послуг відповідно до його сегментації з позиції статистики відносно галузі автомобільних вантажних перевезень, а також досліджує тенденції розвитку динаміки і структури ринку вантажних автомобільних перевезень, особливості впливу ринку транспортної логістики, враховуючи зовнішньоекономічні вантажопотоки автомобільного транспорту, на базові тренди та вплив розвитку логістичної інфраструктури за сукупністю показників розвитку транспортних комунікацій, величини і динаміки розвитку, ринкової сумісності на інвестиційну привабливість.

Н.І. Богомолова [5] систематизує інформацію про державне регулювання транспортної галузі, виділяє політичні, економічні, інформаційні та екологічні аспекти державного регулювання.

Також питаннями правового регулювання на автомобільному транспорті займалися такі фахівці з цивільного та господарського права як А.О. Мінченко, І.В. Булгакова, І.О. Безлюдько, І.А. Діковська, О.В. Клепікова, О.М. Нечипоренко, Д.В. Малишко, Д.К. Медведева, А.Є. Рубан, А.В. Присяжнюк, та ін.

Необхідно зазначити, що проблема правового регулювання автотранспортних перевезень та їх екологічної складової потребує подальшого глибокого наукового аналізу.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є окреслення особливостей державного регулювання автомобільних перевезень шляхом здійснення аналізу підходів до виявлення основних принципів формування транспортної політики в Україні та її екологічної складової.

**Виклад основного матеріалу.** Державне втручання в ринкові процеси визначається комбінацією господарських форм за такими принципами:

1. Відповідність форм господарювання умовам зовнішнього середовища;
2. Принцип цілісності та поєднання різних господарських форм.

Автомобільні перевезення в Україні на сьогоднішній день регулюються низкою законодавчих актів у сфері транспорту, інфраструктури та поштового зв'язку [1; 7].

Нормативно-правовими акти у сфері господарської діяльності щодо надання послуг з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів, багажу є Постанови Кабінету Міністрів України від 05.08.2015 № 609 «Про затвердження переліку органів ліцензування та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України», від 02.12.2015 № 1001 «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів автомобільним транспортом, міжнародних перевезень пасажирів та вантажів автомобільним транспортом», від 23.12.2015 № 1186 «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів річковим, морським транспортом».

Правовими засобами гарантування екологічної безпеки на даний час в Україні є вітчизняне законодавство та досвід зарубіжних країн, яке можна розділити на кілька груп. До першої групи належать нормативно-правові акти що забезпечують зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, зокрема, встановлення вимог до вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна, запровадження адміністративно-правових обмежень для власників транспортних засобів (запровадження європейських вимог до автомобілів Євро-6), встановлення додаткового податкового навантаження на власників автомобілів, а також диференційованого оподаткування транспортних засобів в залежності від екологічного класу.

Другу групу складають правові механізми попередження негативного впливу автомобільного транспорту на життя та здоров'я людини та навколишнього середовища. Проте, процес формування даної групи нормативно-правового забезпечення в Україні ще не завершено.

Третя група законодавчих актів регулює якість пального. Остання група – це правові засоби регулювання відходів.

Основним пріоритетом модернізації автомобільного транспорту є Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року (далі – Стратегія), яка затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2018 року № 430-р. [8], де визначено пріоритети формування комплексної транспортної політики та ефективного державного управління, основні напрями розвитку транспортної галузі України до 2030 р.

Необхідність впровадження Стратегії зумовлена зростанням ВВП зростанням частки українського експорту до ЄС, розвитком міжнародних

транспортних коридорів та транзиту, розвитком цифрової інфраструктури.

Стратегія передбачає створення в Україні безпечного та ефективного інтегрованого транспортного комплексу, інтегрованого у світову транспортну мережу, для забезпечення транспортних потреб населення та покращення умов ведення бізнесу для забезпечення конкурентоспроможності та ефективності національної економіки. Вони забезпечують та розвивають інфраструктуру відповідно до європейських стандартів, покращують безпеку та зменшують негативний вплив на навколишнє середовище, реагуючи на потребу вдосконалення управління, адміністративної реформи та децентралізації центрального управління, антикорупційної політики, корпоративного управління в державному секторі.

В деяких екологічно вразливих регіонах України наразі неможливо будувати об'єкти транспортної інфраструктури через підвищений рівень шуму, обмежень в просторі або наявного негативного впливу руху важкого вантажного транспорту.

Задля досягнення Україною статусу регіонального транспортного хабу Стратегія передбачає використання таких світових тенденцій в галузі транспорту, що зображені на рис. 1.

Основними принципами Стратегії є раціоналізація використання ресурсів задля зниження витрат, зорієнтованість на потребах бізнесу та зростаючих потребах пасажирів, забезпечення мультимодальних перевезень, децентралізація, забезпечення прозорості та узгодженості перевезень, залучення нових джерел фінансування.

Реалізація стратегії передбачається за такими ключовими напрямками (рис. 2).

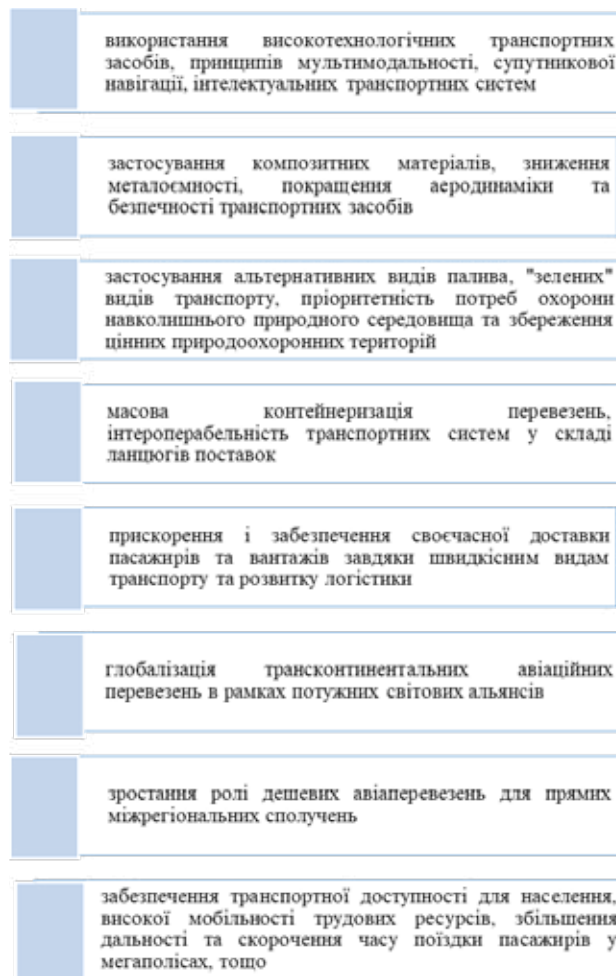


Рис. 1. Світові тенденції в галузі транспорту  
Джерело: сформовано авторами за даними [8].

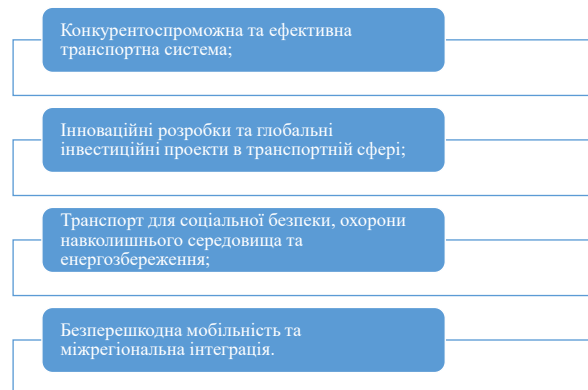


Рис. 2. Ключові напрямки реалізації  
Національна транспортна стратегія України  
на період до 2030 року

З огляду на те, що Україна є транзитною країною, стратегія пропонує використати її транспортний потенціал, створити конкурентоспроможну систему транспортного обслуговування та забезпечити ефективну організацію транспортно-дорожнього комплексу країни. Зокрема, у сфері пасажирських перевезень перспективою є запровадження електронного квитка, розвиток нових міжрегіональних та міжнародних швидкісних сполучень, оновлення міських транспортних інфраструктур, залучення додаткових інвестицій для забезпечення сталого розвитку міського транспорту, заміна застарілих стандартів у галузі транспортних технологій.

Стратегія конкретно стосується таких проблем української транспортної системи (рис. 3).

Важливого значення для забезпечення екологічної безпеки автомобільного транспорту в сучасних умовах має стандартизація, яка забезпечує гарантує єдиний підхід до ремонту, технічної експлуатації, обслуговування та утилізації транспортних засобів; забезпечує гарантії надійності та безпечності транспортних засобів, економію ресурсів та безпеку експлуатації транспортних засобів.

Гарантіями дотримання екологічного законодавства в сфері автомобільного транспорту є Закон України «Про охорону навколишнього середовища», Кодекс України «Про адміністративні правопорушення», Цивільний кодекс України, Кримінальний кодекс України та інші підзаконні нормативні акти.

**Висновки.** Для подальшої перспективи розвитку Національної транспортної стратегії України та директив ЄС необхідним є приведення у відповідність до європейських екологічних стандартів вітчизняного законодавства та прийняття таких законопроектів, як Проект Закону України «Про залізничний транспорт», Проект Закону України «Про внутрішній водний транспорт» (реєстр. № 2475 а), Проект Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України у сфері технічного регулювання та безпеки автомобільного транспорту з метою приведення їх у відповідність з актами Європейського Союзу» (імплементація актів ЄС щодо

Відсутність ефективної системи збору та обробки адміністративних даних про транспортну галузь, а отже, об'єктивної оцінки її стану та перспектив.

Відсутність системного підходу до координації розвитку та перспективного планування всіх видів транспорту з урахуванням соціально-економічних потреб демографічних, комерційних, оборонних та геополітичних інтересів України.

Адміністративна реформа незавершена.

Відсутність ефективних систем контролю за ефективністю управлінських рішень та недостатня прозорість у звітності та поведінці органів державної влади та суб'єктів державного сектору транспортної сфери.

Відсутність ефективних систем зворотного зв'язку між транспортними органами, транспортними компаніями та користувачами транспортних послуг, що знижує ефективність управління транспортом та якість транспортно-логістичних послуг.

Відсутність стандартів та систем індикаторів оцінки якості транспортних послуг.

Низький рівень розвитку мультимодальних перевезень, мультимодальних перевезень та транспортної логістики.

Тенденція зниження ефективності використання потужностей.

**Рис. 3. Проблеми української транспортної системи, на вирішення яких спрямована Національна транспортна стратегія України**

технічного регулювання); Проект Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів щодо врегулювання роботи таксі, легкових автомобілів на замовлення та інформаційно-диспетчерських служб» (реєстр. № 3107 а); Проект Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України у сфері автомобільного транспорту з метою приведення їх у відповідність з актами Європейського Союзу» (стосовно доступу до ринку); Проект Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів щодо посилення габаритно-вагового контролю».

#### Список літератури:

1. 40% пріоритетних для держави інвестпроектів складають проекти у галузі інфраструктури та транспорту. 2020. 20 листопада. *Офіційний веб-портал Міністерства інфраструктури України*. URL: <https://mtu.gov.ua/news/32396.html>
2. Drones in the Transport System: Acceptability and Integration. *International Transport Forum*. URL: <https://www.itf-oecd.org/drones-transport-system-acceptability-integration>

3. Богомолова Н.І. Особливості державного регулювання розвитку транспорту мегаполісу. *Зб. наук. праць ДЕТУТ*. Серія «Економічні науки». 2015. № 33. С. 213–218.
4. Державне агентство автомобільних доріг України Укравтодор. URL: <https://ukravtodor.gov.ua/>
5. Дзядичевич Ю.В., Куликовська І.М. Перспективи розвитку автотранспортної системи України. *Інноваційна економіка*. 2012 № 4. С. 16–19.
6. Закон України «Про автомобільний транспорт». № 22. *Відомості Верховної ради України* від 01.06.2001, № 22.
7. *Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України*. URL: <http://mtu.gov.ua/documents/358.html>
8. Поліщук О. М. Інноваційні перетворення на транспорті як чинник модернізації управління транспортними потоками великих міст / О. М. Поліщук. *Формування ринкових відносин в Україні*. 2015. № 7. С. 45–49. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/frvu\\_2015\\_7\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/frvu_2015_7_13)
9. Попович П. В. Дослідження тенденцій розвитку ринку вантажних автомобільних перевезень у сучасних умовах. П. В. Попович, О. С. Шевчук, А. Й. Матвійшин, В. М. Лотоцька. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*. 2016. № 2. С. 224–229. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2016\\_2\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2016_2_35)
10. Проект Закону України «Про внесення змін до Господарського кодексу України (щодо узгодження з положеннями Цивільного кодексу України та деяких інших законодавчих актів)» від 29 вересня 2020 р. *Офіційний веб-портал Верховної Ради України*. URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511)
11. Рудченко О.Ю., Поліщук О.М. Механізм державного регулювання транспортної інфраструктури мегаполісів. *Університетські наукові записки*. 2017. № 6. С. 93–100.
12. Січкарь Д. Транспортна галузь у 2020 році. *Веб-портал Європейської Бізнес Асоціації*. 2020. 22 грудня. URL: <https://eba.com.ua/transportna-galuz-u-2020-rotsi/>
13. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.04.2018р. № 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>
14. Фалович Н. М. Засади розвитку координування як емерджентної якості ланцюга поставок інвестиційних товарів / Володимир Фалович, Наталія Фалович, Світлана Семенюк. *Галицький економічний вісник*. Т. : ТНТУ, 2021. Том 69. № 2. С. 146–152. (Маркетинг).
15. Фалович В.А. Перспективи залучення промислових підприємств України до міжнародних ланцюгів поставок / В.А. Фалович. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2016. № 487. С. 170–177.
16. Фалович В.А. Інвестування у відносини ланцюга поставок в концепції Індустрія 4.0 / В.А. Фалович. *Електронний фаховий науковопрактичний журнал «Інфраструктура ринку»*. 2018. Вип. 15. С. 127–136.

**Falovych N.M., Falovych V.A., Shevchuk O.S., Popovich P.V., Chorna O.V.**

#### **GOVERNMENT REGULATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY ON MOTOR TRANSPORT**

*Road transport is one of the important sectors of the national economy, which protects the economic interests of the state, defense, improving living standards and the impact of various environmental factors on the environment. That is why the improvement of state regulation of road transport in the field of transportation is very important, because solving this problem is important for the integration of Ukraine's transport system into the transport systems of Europe, Asia and the Baltic and Black Sea regions. To this end, Ukraine should adopt the experience of the European Union in charging for the use of transport infrastructure in order to restore the ecological balance and compensate for the damage caused by transport to the environment.*

*Given that Ukraine is a transit country, the new transport strategy proposes to use its transport potential, create a competitive transport service system and ensure effective organization of the country's transport and road complex. In particular, in the field of passenger transport the prospect is the introduction of electronic tickets, development of new interregional and international high-speed connections, upgrade of urban transport infrastructures, attracting additional investments to ensure sustainable development of urban transport, replacement of outdated standards in transport technology.*

*The strategy envisages the creation in Ukraine of a safe and efficient integrated transport complex, integrated into the world transport network, to meet the transport needs of the population and improve the conditions for doing business to ensure the competitiveness and efficiency of the national economy. They provide and develop infrastructure in accordance with European standards, improve security and reduce the negative impact on the environment, responding to the need to improve governance, administrative reform and decentralization of central government, anti-corruption policy, corporate governance in the public sector.*

**Key words:** road transport, transport strategy, ecological component, ecological safety, state regulation.

УДК 629.463.32

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/43>**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ ДВОХСЕКЦІЙНОГО

Підвищення об'ємів перевезень наливних вантажів через міжнародні транспортні коридори зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію транспортних засобів для їх перевезень. Для забезпечення ефективності перевезень наливних вантажів залізницею запропоновано концепт несучої конструкції вагона-цистерни двохсекційного. Особливістю конструкції вагона-цистерни є те, що внутрішній об'єм котла розділений на окремі секції. Таке рішення сприяє можливості одночасного перевезення різноманітних вантажів у вагоні-цистерні, скороченню витрат на утримання, а також порожніх пробігів. Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни в просторі між секціями та внутрішньою оболонкою котла розміщується енергопоглинальний матеріал.

Для обґрунтування запропонованого удосконалення проведено математичне моделювання повздовжньої динамічної навантаженості вагона-цистерни двохсекційного. Вагон-цистерна розглядається як система з декількох тіл: несуча конструкція, що спирається на типові візки моделі 18–100 та наливний вантаж. Рух наливного вантажу описувався сукупністю математичних маятників. У якості наливного вантажу прийнятий бензин. Розрахунок здійснено за умови 95% завантаженості секцій. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-цистерну, прийнята рівною 3,5 МН. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснено за методом варіації довільних постійних та підтверджено методом Рунге-Кутта. Початкові умови закладені рівними нулю. Встановлено, що максимальна величина прискорення, що діє на несучу конструкцію вагона-цистерни складає 37,2 м/с<sup>2</sup>. Отримана величина прискорення на 7% нижче за прискорення, що виникає в конструкції без енергопоглинального матеріалу.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних багатифункціональних конструкцій вагонів-цистерн для перевезень широкої номенклатури вантажів.

**Ключові слова:** транспортна механіка, вагон-цистерна, несуча конструкція, динамічна навантаженість, повздовжня динаміка.

**Постановка проблеми.** Перспективи підвищення обертів наливних вантажів в напрямку міжнародних транспортних коридорів зумовлюють необхідність впровадження в експлуатацію транспортних засобів для їх перевезень. Відомо, що перевезення наливних вантажів залізницею здійснюється здебільшого вагонами-цистернами або контейнерами-цистернами.

Використання контейнерів-цистерн для перевезень наливних вантажів зумовлена їх мобільністю. В той же час застосування у перевізному процесі вагонів-цистерн дозволяє здійснювати одночасне перевезення більшого об'єму вантажів ніж у контейнерах-цистернах. У зв'язку з цим для підвищення ефективності перевезень наливних вантажів залізничним транспортом доцільним є впровадження інноваційних конструкцій транспортних засобів, які поєднували б у собі переваги вищезазначених. Тому виникає необхід-

ність проведення відповідних досліджень в цьому напрямку.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В публікації [1] висвітлено особливості навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни при маневровому співударянні. Отримано залежності впливу наливного вантажу на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни.

Вплив переміщень наливного вантажу на навантаженість котла вагона-цистерни досліджено у статті [2]. Визначено, розподілення динамічних навантажень за довжиною несучої конструкції вагона-цистерни. Однак, заходів щодо зменшення навантаженості вагона-цистерни в експлуатації в даних роботах не запропоновано.

В роботі [3] проведено обґрунтування удосконалення конструкції опорного пристрою вагона-цистерни для перевезень наливних вантажів.

Результати розрахунку на міцність підтвердили доцільність запропонованих заходів щодо удосконалення.

Перспективні варіанти удосконалень несучих конструкцій вагонів-цистерн розглянуті у роботі [4]. Запропоновано нову конструкцію вагона-цистерни з конусоподібними консольними вставками та безазорним пристроєм зчеплення.

Разом з цим запропоновані заходи щодо удосконалення несучих конструкцій вагонів-цистерн не сприяють зменшенню їх динамічної навантаженості в експлуатації.

Авторами роботи [5] запропоновано можливі шляхи підвищення універсальності вагонів-цистерн. Проведено визначення міцності та стійкості вагона-цистерни. Результати досліджень підтвердили можливість модернізації вагонів-цистерн з метою розширення номенклатури перевозимих у них вантажів.

Дослідження удароміцності залізничного вагона-цистерни з композитних матеріалів, армованих волокном наведені у роботі [6]. Встановлено, що ефект початкового натягіння волокон більш значний у випадку, коли навантаження діє паралельно напрямку основного волокна. Важливо сказати, що запропоновані конструкції вагонів-цистерн не дозволяють здійснювати перевезення різнотипних вантажів одночасно, що знижує їх універсальність та затребуваність.

Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів при експлуатаційних режимах висвітлюються в публікаціях [7; 8]. При цьому авторами запропоновано впровадження податливих зв'язків в несучі конструкції вагонів. Дослідження проведені шляхом математичного моделювання та підтверджені комп'ютерним з використанням сучасних

засобів програмування. Разом з цим питанню зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни авторами уваги не приділялося.

#### Постановка завдання.

Метою статті є висвітлення результатів моделювання повздовжньої навантаженості вагона-цистерни двохсекційного. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- провести математичне моделювання повздовжньої динамічної навантаженості вагона-цистерни двохсекційного;
- визначити вплив сили удару на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для підвищення ефективності експлуатації вагона-цистерни пропонується удосконалення його конструкції шляхом розділення внутрішнього об'єму котла 1 на окремі секції 2, виготовлені з композитного матеріалу, які оснащені завантажувальними люками 3 та зливними пристроями 4 (рис. 1). В просторі між секціями 2 та внутрішньою оболонкою котла 1 розміщується енергопоглинальний матеріал 5 для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни.

Запропоноване рішення сприятиме можливості одночасних перевезень різнотипних вантажів у вагоні-цистерні, скороченню витрат на утримання, а також порожніх пробігів. Крім того, наявність енергопоглинального матеріалу в конструкції вагона-цистерни сприятиме зменшенню його динамічної навантаженості, а як наслідок пошкоджень складових, а отже і витрат на утримання в експлуатації.

Для обґрунтування запропонованого рішення проведено математичне моделювання динамічної

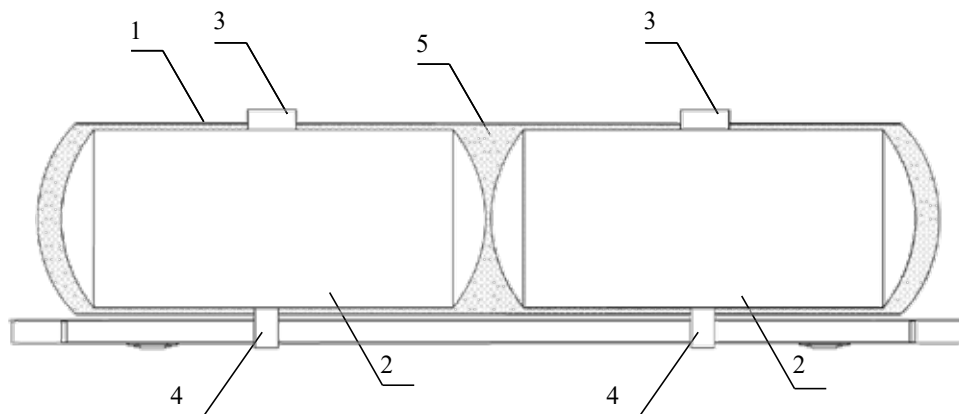


Рис. 1. Несуча конструкція вагона-цистерни

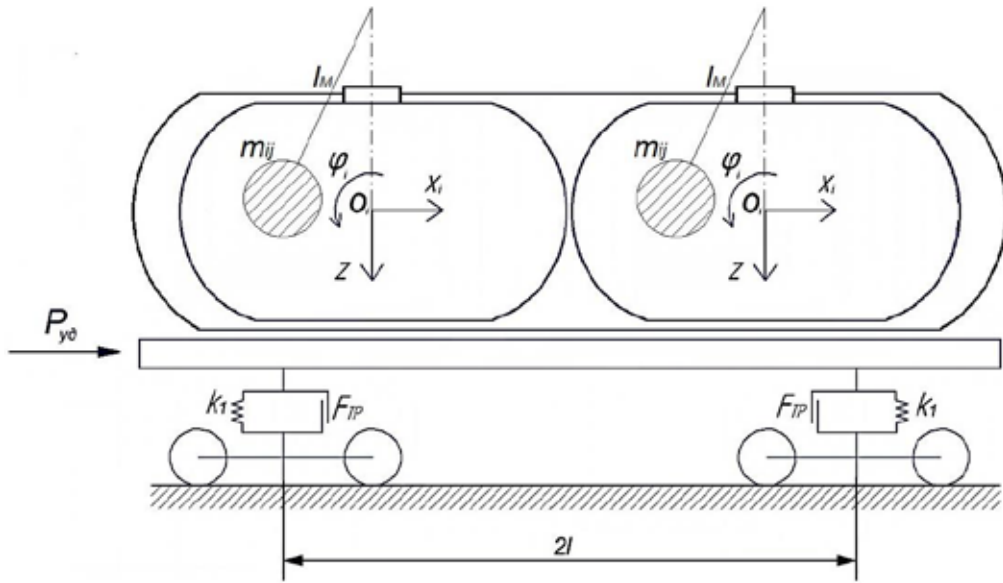


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-цистерни

навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни [9]. Вагон-цистерна розглядався як система з декількох тіл: несуча конструкція, що спирається на типові візки моделі 18–100 та наливний вантаж. Розрахункову схему вагона-цистерни наведено на рис. 2.

$$M'_p \cdot \ddot{x}_p + M_p \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_p = F'_n, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_p \cdot \ddot{\varphi}_p + M_p \cdot h \cdot \ddot{x}_p - g \cdot \varphi_p \cdot M_p \cdot h = \\ = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + \\ + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \end{aligned} \quad (2)$$

$$M_p \cdot \ddot{z}_p = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

$$\left( m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_p + I_c \cdot \ddot{\varphi}_p - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \left( I_{\theta} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\varphi}_p + I_c \cdot \ddot{x}_p + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - \\ - g \cdot I_c \cdot \varphi_p = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\left( m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{z}_p = 0, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_p - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_p + \\ + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \xi_{ij} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$F_n = P_{y0} - c \cdot x_p - \beta \cdot \dot{x}_p, \quad (8)$$

$$I_c = \left( m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right), \quad (9)$$

$M_p$  – маса рами вагона-цистерни;  $I_p$  – момент інерції рами відносно повздовжньої осі;  $m_T$  – маса візка;  $I$  – момент інерції колісної пари;  $r$  – радіус середнезношеного колеса;  $n$  – кількість осей візка;  $l$  – напівбаза вагона-цистерни;  $P_{y0}$  – значення повздовжньої сили удару в автозчеп;  $F_{TP}$  – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті;  $k_1, k_2$  – жорсткість пружин ресорного підвішування візків;  $k$  – кількість тонів коливань наливного вантажу;  $m_i$  – маса тіла, яке еквівалентне  $i$ -ій секції з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно неї;  $m_{ij}$  – маса  $j$ -го маятника у  $i$ -ій секції;  $z_{ci}$  – висота центру ваги секції;  $c_{ij}$  – відстань від площини  $z_i=0$  до точки закріплення  $j$ -го маятника у  $i$ -ій секції;  $l_{ij}$  – довжина  $j$ -го маятника;  $I_{\theta}$  – приведений момент інерції  $i$ -ої секції та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно неї;  $I_{ij}$  – момент інерції маятника;  $x_p, \varphi_p, z_p$  – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої осі та вертикальному переміщенню рами;  $\xi_{ij}$  – кут відхилення  $j$ -го маятника від вертикалі;  $c$  – жорсткість енергопоглинального матеріалу;  $\beta$  – коефіцієнт в'язкого опору енергопоглинального матеріалу.

Рух наливного вантажу в секціях описувався сукупністю математичних маятників [9; 10]. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-цистерна, прийнята рівною 3,5 МН [11; 12].

Жорсткість енергопоглинального матеріалу складала близько 75 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 115 кН·с/м, що визначено шляхом математичного моделювання. Визначення гідродинамічних

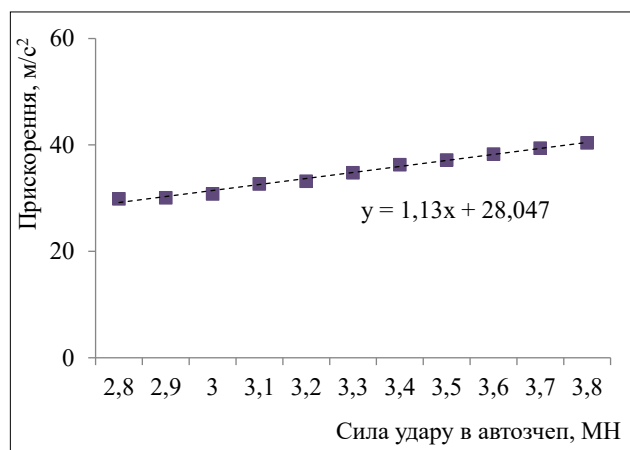


Рис. 3. Залежність прискорень в несучій конструкції вагона-цистерни від сили удару в автозцеп

характеристик наливного вантажу здійснювалося за методикою, наведеною у [10]. У якості наливного вантажу прийнятий бензин. На підставі проведених розрахунків для випадку максимально-допустимої завантаженості секції (95%), отримано значення  $m_{ij} \approx 6,8$  т,  $I_{ij} \approx 243$  т·м<sup>2</sup>. Розв'язок диференціальних рівнянь (1)–(7) здійснено за методом варіації довільних постійних та підтверджено методом Рунге-Кутта [13–15]. При цьому початкові умови закладені рівними нулю [16; 17]. Результати розрахунку показали, що максимальна величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-цистерни складає 37,2 м/с<sup>2</sup>. Отримана величина прискорення на 7% нижче за прискорення, що виникає в конструкції без енергопоглинального матеріалу.

За математичною моделлю (1)–(7) проведено варіаційні розрахунки та визначено вплив сили

удару на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни (рис. 3).

Встановлено, що ця залежність є лінійною. Хотілося б відзначити, що з урахуванням запропонованих заходів щодо удосконалення несучої конструкції вагона-цистерни прискорення, які діють на неї знаходяться в межах допустимих при величині сили повздовжнього удару у 3,72 МН. При цьому у якості допустимих прийнято прискорення, які зазначено у [18].

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних багатофункціональних конструкцій вагонів-цистерн для перевезень широкої номенклатури вантажів.

### Висновки

1. Проведено математичне моделювання повздовжньої динамічної навантаженості вагона-цистерни двохсекційного. Встановлено, що з урахуванням жорсткості енергопоглинального матеріалу, яким заповнено простір між секціями, 75 кН/м та коефіцієнті в'язкого опору 115 кН·с/м, максимальна величина прискорення, що діє на несучу конструкцію вагона-цистерни складає 37,2 м/с<sup>2</sup>. Отримана величина прискорення на 7% нижче за прискорення, що виникає в конструкції без енергопоглинального матеріалу.

2. Визначено вплив сили удару на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни. Встановлено, що з урахуванням запропонованих заходів щодо удосконалення несучої конструкції вагона-цистерни прискорення, які діють на неї знаходяться в межах допустимих при величині сили повздовжнього удару у 3,72 МН.

### Список літератури:

1. Iman H. Ashtiani, Subhash Rakheja, Waiz Ahmed. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019, Vol. 233, Issue 10. <https://doi.org/10.1177/0954409718823650>
2. Shi H, Wang, L, Nicolsen, B, et al. Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics. Proc IMechE, Part K: J Multi-body Dynamics. 2017, Vol. 231. P. 608–629.
3. Glib Vatulia, Anatolii Falendysh, Yevhen Orel, Mykhailo Pavliuchenkov. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia engineering*. 2017, Vol. 187. P. 301–307.
4. Атаманчук Н. А., Цыганская Л. В. Направления совершенствования конструкций вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов. *Транспорт Российской Федерации*. 2013, № 3(46). С. 14–17.
5. Песляк А. В., Битюцкий Н. А., Сувернев М. Н., Фомин А. Н. Повышение универсальности вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020, Т. 17, Вып. 4. С. 477–489. doi: 10.20295/1815-588X-2020-4-477-489
6. George Edward Street, Preetum Jayantilal Mistry, Michael Sylvester Johnson. Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*. 2021, Vol. 5 (6), Issue 152, <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>
7. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Lovska A., Kravchenko K. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 2021. Vol. 14 (8), 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>



8. Oleksij Fomin, Glib Vatulia, Alyona Lovska. Dynamic load modelling for tank containers with the frame of circle pipes and structurally improved fittings. *E3S Web of Conferences*. 2020, Vol. 166, 07001 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607001>
9. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипченко О. П., Черномашенцева Ю. Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. Зб. наук. праць «Динаміка та керування рухом механічних систем». Київ : АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87–95.
10. Кривовязюк Ю. П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог и тяга поездов.» Днепропетровск, 1986. 157 с.
11. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.
12. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.
13. Lovska A., Fomin O. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry. *Acta Polytechnica*. 2020, Vol. 60(6), P. 478–485.
14. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Dynamic Load and Strength Determination of Carrying Structure of Wagons Transported by Ferries. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, Vol. 8(902). doi:10.3390/jmse8110902.
15. Lovska A., Fomin O., Kučera P., Pištěk V. Calculation of Loads on Carrying Structures of Articulated Circular-Tube Wagons Equipped with New Draft Gear Concepts. *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10(7441), doi:10.3390/app10217441.
16. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Dynamic Load Modelling within Combined Transport Trains during Transportation on a Railway Ferry. *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10(5710), <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
17. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021, Vol. 2/7 (110), P. 6–15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
18. ГОСТ 31232-2004. Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности. Минск, 2005. 6 с.

#### **Fomin O.V., Lovska A.O. DYNAMICAL MODELLING OF THE CONTINUOUS LOADING OF A DOUBLE SECTION TANK WAGON**

*Increased volumes of liquid cargo through the international transport corridors necessitates the introduction into service of vehicles for their transportation. To ensure the efficiency of transport of liquid cargo by the railway introduced the concept of load-bearing design tank wagon bisection. The peculiarity of tank wagon design is that the internal volume of the boiler is divided into separate sections. This solution contributes to the possibility of simultaneous transport of diverse liquids in the tank wagon, reduced costs for maintenance, as well as empty runs. To reduce the dynamic load-bearing structures of the tank car in the space between the sections and the inner shell of the boiler is placed energopoglnalnyy material.*

*The mathematical modelling of the continuous dynamic loading of the tank wagon was carried out to justify the proposed improvement. The tank wagon was regarded as a system of several bodies: the load-bearing structure which is supported by type of bars (model 18–100) and the loading tank. The flow of the liquid cargo was described by a set of mathematical pendulums. Gasoline was taken as liquid cargo. The calculation was carried out assuming that the sections were 95% loaded. The value of the overhead impact force, which acts on the tank wagon is taken equal to 3.5 MN The determination of differential equations of motion was carried out by the method of variation of constant values and confirmed by Runge-Kutta method. Initial conditions are set equal to zero. It is found that the maximum magnitude of acceleration, which acts on the load carrying structure is 37.2 m/s<sup>2</sup>. The obtained value of acceleration is 7% lower than the acceleration occurring in the structure without energy-global material.*

*The research will help to develop recommendations for designing modern tank wagons which have a high load capacity and are suitable to transport a wide range of cargo.*

**Key words:** transport mechanics, tank wagon, load-bearing structure, dynamic load, dynamic load.

## **БУДІВНИЦТВО**

УДК 691(075)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/44>

**Коверніченко Л.М.**

Криворізький національний університет

**Сізий Б.С.**

Відокремлений структурний підрозділ

«Криворізький фаховий коледж Національного авіаційного університету»

### **ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДІЛИ В ПІДГОТОВЦІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Стаття присвячена дослідженню будівельних матеріалів різноманітними методами. При дослідженні якісних показників компонентів, нових складів, технологічних удосконалень і т. п. Може бути застосована єдина методична основа. Вона полягає в тому, що досліджувані явища і характеристики порівнюють у відповідних умовах. Часто ці порівняння проводять при рівних, а не відповідних умовах, наприклад при рівній міцності, рівному фазовому складі, однакових технологічних операціях, що дорівнює витраті компонента і т. п. Тим часом таке порівняння правомірно тільки в окремому випадку. Досліджено що не можна, наприклад, без урахування структурних особливостей робити висновки про ідентичність якості двох матеріалів, що володіють однаковою міцністю або іншими однаковими властивостями.*

*Доведено, що метод вирішення такого завдання з позицій загальної теорії, полягає в тому, що порівнюються властивості в 'яжучих речовин при їх оптимальних структурах. І тому якщо серед порівнюваних речовин було знайдено в 'яжуче з найкращими показниками якості, то по закону обов'язкової відповідності властивостей воно буде найкращим і у виробі при прийнятих технологічних умовах і режимах. Отримані відомості про показники властивостей служать, крім того, вихідними даними при подальшому проектуванні оптимального складу, повністю задовольняє заданим технічним вимогам.*

*Визначено, що методичні основи теорії полягають також в тому, що за допомогою методу проектування видається необмежена кількість оптимальних складів. Однак, на заключній стадії проектування з багатьох оптимальних вибирають тільки один або кілька раціональних складів, які найбільш повно відповідають конкретним технологічним умовам, заданим показниками якості та економічної ефективності. Порівняння оптимальних складів між собою при виборі раціонального роблять за розрахунковими формулами і графіками-номограмами, що дозволяє без великих експериментальним досліджень порівнювати між собою основні характеристики при оптимальних структурах.*

**Ключові слова:** будівельні матеріали, характеристика, порівняння, вибір, структури.

#### **Вступ**

Будівельні матеріали досліджують різноманітними методами. При дослідженні якісних показників компонентів, нових складів, технологічних удосконалень і т. п. Може бути застосована єдина методична основа. Вона полягає в тому, що досліджувані явища і характеристики порівнюють у відповідних умовах. Часто ці порівняння роблять при рівних, а не відповідних умовах, наприклад при рівній міцності, рівному фазовому складі, однакових технологічних операціях, що дорівнює витраті компонента і т.п. Тим часом таке порівняння правомірно тільки в окремому випадку. Не можна, наприклад, без урахування

структурних особливостей робити висновки про ідентичність якості двох матеріалів, що володіють однаковою міцністю або іншими однаковими властивостями.

**Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** У технології виробництва матеріалів можна виділити ряд типових операцій або технологічних переділів: підготовчі роботи; транспортування і зберігання (зазвичай в бункерах або силосах) підготовлення матеріалів; дозування; подача в змішувальний апарат; перемішування від дозованих матеріалів; транспортування отриманої суміші (маси) до місця її використання; застосування суміші (маси) в конструкціях, нових

технологічних переділах і т. п. з наданням їй зв'язкового стану у вигляді матеріалу, здатного зберегти необхідну форму на наступних стадіях технології; обробка сформованих матеріалів шляхом впливу температурних, силових та інших факторів звільнення виробів або конструкцій від допоміжних форм і транспортування, коли потрібно, до місць зберігання або нової спеціальної обробки; складування виробів і конструкцій виготовлених з матеріалу; оцінка якості продукції на різних стадіях технології виготовлення суміші (маси); транспортування готової продукції до місць застосування її в будівництві.

До найбільш важливих в структуроутворенні відносяться: підготовчі операції, перемішування від дозованих матеріалів, ущільнення суміші (маси), обробка відформованих виробів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Підготовчі операції супроводжують практично всі технологічні процеси. Основне завдання підготовчих операцій полягає в розкритті потенційних властивостей вихідних матеріалів, особливо наповнювачів і в'язучої речовини. На стадії підготовчих операцій кожен матеріал-компонент суміші – виходить по можливості найбільший термодинамічний активний стан. Залежно від різновиду підготовлюваного матеріалу-операції носять різний характер: дроблення, подрібнення, помел, або розпушки; фракціонування, просівання, промивка; зволоження і зневоднення; сушка і нагрівання, випалювання та охолодження; збагачення та фізико-хімічна обробка; надання однорідності (гомогенності) і ін.

Подрібнення-одна з найбільш поширених операцій. Зменшення розмірів частинок грубозернистих матеріалів (щебню, гравію, руди, деревини та ін.) Може бути викликано необхідністю забезпечити певні відповідності між розмірами частинок матеріалу і конструктивних елементів виробів, полегшити технологічні операції на стадіях виготовлення суміші (маси), підвищити щільність і однорідність дробленого заповнювача, розділити грубозернистий матеріал на більш дрібні складові його фракції.

Дослідженнями встановлено, що забруднюючі домішки негативно впливають на якісні характеристики матеріалів. Вони знижують, як правило, їх міцність і однорідність, так як частинки заповнювача ізолюються від контакту і зчеплення з в'язучою частиною. Здатність кристалічних новоутворень на наступних стадіях технологічного процесу утворювати міцний зросток з кристалами, складовими заповнювача (наприклад,

гідратів новоутворень при твердінні цементного бетону), обумовлюється в основному чистою його поверхні. Застосування повністю очищених матеріалів дозволяє більш точно встановити технологічні параметри, полегшує вирішення завдання управління процесами спрямованого структуроутворення і отримання матеріалу із заданими властивостями, знижує кількість випадкових факторів до мінімуму, зменшуючи їх вплив на якість готової продукції.

**Постановка задачі.** У теоретичному плані операції, що виконуються на стадії підготовчих робіт, базуються на фізичних, механічних, хімічних, фізико-хімічних та інших закономірностях.

Основна увага приділяється забезпеченню необхідних розмірів і форми зерен і частинок, оптимального гранулометричного складу, мінімальної витрати енергії механічних машин для дроблення і подрібнення. При подрібненні дрібнозернистих і тонко дисперсних матеріалів (помелу мінерального порошку, домелу цементу та ін.) Мається на меті збільшення питомої поверхні, а отже підвищення фізико-хімічної та хімічної активності часток. Зі зменшенням розмірів кожної частки при подрібненні поверхня її швидко збільшується, тоді як обсяг частинок при додаванні уламків залишається постійним. Швидко збільшується з подрібненням поверхня, що є в гетерогенних системах завжди поверхнею розділу з іншого фазою, яка володіє особливим запасом поверхневої енергії. Якщо віднести її до одиниці поверхні, то відповідна величина становить поверхневий натяг, тобто, утворює максимальну роботу, затрачену на утворення одиниці поверхні. Поверхневий натяг впливає на багато властивостей твердих і рідких тіл.

Відповідно до принципу Гіббса-Кюрі при підвищенні ступеня дисперсності речовини збільшується її розчинність, хімічна активність і ін. [1, с. 110; 2, с. 12]. При механічному подрібненні розриваються окремі хімічні зв'язки з утворенням на поверхні вільних атомних груп і радикалів, з виникненням іонів з некомпенсованими зарядами. Утворені при подрібненні частки-уламки кристалічної решітки – є складними просторовими електричними системами, які взаємодіють із зовнішнім середовищем як складні електричні поля.

**Викладення матеріалу та результати.** Виникнення свіжої поверхні, наприклад, при дробленні мінералів і гірських порід, зазвичай супроводжується появою електричних зарядів, знак і величина яких залежать від характеру речовини

і розміру часток. Електричне поле виникає найбільш інтенсивно в перший момент дроблення, під впливом якої свіжо утворена поверхня має підвищену реакційну здатність.

Залежно від розташування по-різному заряджених атомів, іонів і молекул свіжо утвореними поверхню мінеральної частини заряджаються або позитивно, як, наприклад, у часток кальциту, доломіту і інших представників класу карбонатів, або переважно негативно, як, наприклад, у частинок кварцу, глинистих матеріалів та ін., або ж поверхня частинок може виявитися нейтральною, як наприклад, у графіту, тальку і ін. [4, с. 56; 5, с. 53; 6, с. 27].

Дроблення і тонке подрібнення нерідко призводять до часткового розриву хімічних зв'язків, оголення активних хімічних сполук, здатних до підвищеної активності при взаємодії з реагентами навколишнього середовища, наприклад в процесі домола портландцементу в водному середовищі, або у водному розчині поверхнево-активних речовин. Створюються сприятливі умови для протікання фізико-хімічних процесів на межі поділу фаз у вигляді змочування, адсорбції, розчинення і т.п.

Мензурку 250 см<sup>3</sup> наповнюють до рівня в 130 см<sup>3</sup> сухим піском і доливають до рівня в 200 см<sup>3</sup> 3%-ним розчином їдкого натру. Після струшування пробу залишають на 24 години, а потім визначають кольори рідини над піском, порівнюючи їх з кольорами свіжоприготовленого еталона.

У сумнівних випадках випробувану пробу підігривають 2-3 години на водяній бані.

Готування еталона: беруть 2%-ний розчин аніна в 1%-ному розчині алкоголю в кількості

2,5 см<sup>3</sup> на 97,5 см<sup>3</sup> 3 %-ного розчину їдкого натру. Суміш збовтують і залишають на 24 години. Якщо рідина над піском не темніше еталона, пісок вважається задовільним; при фарбуванні темніше еталона – червонувата, коричнева й більш темна, тоді якість піску – сумнівна. Вирішальним випробуванням є визначення міцності зразків цементно-піщаного розчину.(Рис.1).

Забруднення органічними речовинами визначають колориметричним способом; це випробування необхідно, але недостатньо для ствердження про придатність піску.

Цементний розчин нормальної консистенції для виготовлення трьох зразків-балочок готують так само, як і для визначення нормальної густоти розчину, тобто цементу 500 г і піску 1500 г. На кожен намічений термін іспиту виготовляють три зразки. Для ущільнення розчину підготовлену форму з насадкою міцно закріплюють на стандартній лабораторній віброплощадці (рис.), що створює вертикальні коливання з амплітудою 0,35 мм і частотою 2800-3000 об./хв. Готовий розчин укладають у гнізда форми шаром приблизно 1 см і включають віброплощадку. Потім протягом 2 хв вібрації всі три гнізда форми рівномірно невеликими порціями заповнюють розчином. Після закінчення 3 хв від початку вібрації віброплощадку виключають і з неї знімають форму. Потім ножом, змоченим водою, зрізують надлишок розчину, загладжують поверхню зразків урівень із краями форми і маркують зразки.

Готові зразки у формах зберігають у ванні з гідравлічним затвором протягом (24 ± 2) год. Потім зразки обережно розформовують і укладають у горизонтальному положенні у ванну з водою, де зберігають їх до моменту випробування.

Після чого визначають межу міцності контрольних зразків та на піску забрудненому органічними речовинами за допомогою випробувальної машини МІІІ-100 або гідравлічного пресу.

При випробуванні зразка на стиск швидкість збільшення навантаження повинна бути близько 5 кН/с.

Межа міцності при стиску [МПа (кгс/см<sup>2</sup>)]

$$R_{ст} = P/S.$$

де  $P$  – руйнівне навантаження, Н (кгс);  $S$  – площа грані, м<sup>2</sup> (см<sup>2</sup>).

Контрольні зразки:

$$R_1=9150/25=36.6 \text{ (МПа)}$$

$$R_2=9235/25=36,9 \text{ (МПа)}$$

$$R_3=9050/25=36,2 \text{ (МПа)}$$

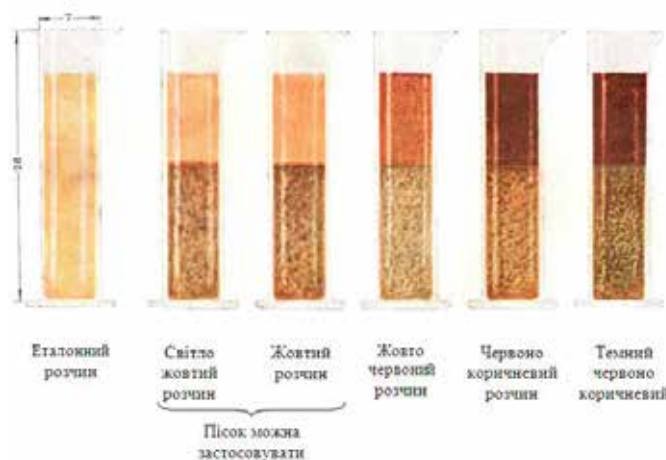


Рис. 1. Випробування піску на наявність органічних включень обробкою їдким натром

$$R_4=8990/25=35,9(\text{МПа})$$

$$R_5=3200/25=36,8(\text{МПа})$$

$$R_6=9100/25=36,4(\text{МПа})$$

Забруднені органічними включеннями:

$$R_1=8020/25=32,1(\text{МПа})$$

$$R_2=7980/25=31,9(\text{МПа})$$

$$R_3=8150/25=32,6(\text{МПа})$$

$$R_4=7400/25=32,4(\text{МПа})$$

$$R_5=3780/25=31,2(\text{МПа})$$

$$R_6=8090/25=32,4(\text{МПа})$$

Операції з подрібнення вихідних матеріалів часто поєднують з поділом по крупності (класифікацією). Ступінь активності до процесів структуроутворення при виготовленні матеріалів зростає з підвищенням дисперсності частинок. Великі фракції також виконують відповідальні функції в формуванні структури і властивостей. Так, наприклад, щебінь і пісок не тільки майже повністю заповнюють обсяги виробу, а й сприяють значну частину внутрішньої напруги.

Армуючі наповнювачі підвищують міцність виробу на розтягнення, або вигин зі збільшенням довжини волокон. Кількість одержуваних фракцій і межі розмірів частинок в них обумовлюються технологічними вимогами і проектним складом виробу. У порошкоподібних матеріалах фракціонування проводиться за допомогою різного роду сепарацій. Зазвичай великі частки направляються на повторний помел. Важливою характеристикою порошкоподібного матеріалу і, зокрема, показником оптимального гранулометричного складу є його щільність. В ступінь дисперсності порошкоподібного матеріалу вносяться певні обмеження, так як енергетичні потенціали поверхні після деяких переділів тонкого помелу настільки зростають, що відбувається мимовільне (спонтанне) агрегування частинок зі зменшенням питомої поверхні і збільшенням грудкуваті і неоднорідності вихідного продукту як активного компонента матеріалу. Крім того, якщо подрібнений матеріал є не тільки реакційно активним, але і складним за своїм хімічним складом, причому на подальших стадіях технології, наприклад перемішування з середовищем, утворює нові хімічні сполуки в одиницю часу, то подрібнення здійснюють з урахуванням певної оптимальної межі. Цю межу встановлюють за допомогою попередніх досліджень і з урахуванням передбачуваної технології та її основних параметрів.

У загальному випадку раціональний перерозподіл тонкості помелу встановлюють експериментальним шляхом. Він може бути значно підвищений при застосуванні додаткових речовин, здатних екранувати частки і тим самим запобігати агрегування, а також обмежується їх енергією активації.

Зі збільшенням дисперсності завжди зростає небезпека втрат активності порошкоподібного матеріалу в період тривалого зберігання в зв'язку з адсорбцією і хемосорбцією сторонніх речовин з навколишнього середовища.

Однією з важливих операцій підготовчого періоду в технології виробництва штучних будівельних матеріалів є промивка зернистих фракціонованих матеріалів-щебню, дробленого гравію, піску – з метою звільнення їх від забруднюючих домішок (пилуватих, глинистих і т.п.).

Матеріал промивають чистою водою або з додаванням в неї деяких поверхнево-активних компонентів, що сприяють швидкому просихання промитих частинок за рахунок виборчої гідрофобізації їх поверхні і подальшого зісковзування з неї крапель води. Швидке висихання особливо необхідне в зимовий час, щоб запобігти змерзання вологого заповнювача, і тоді застосування поверхнево-активних добавок особливо ефективно при зневодненні дрібних фракцій матеріалів. В процесі мокрого відділення механічних домішок від заповнювача дотримується певна послідовність операцій: зволоження, промивка, ополіскування і зневоднення. Мокра очистка нерідко поєднується з грохоченням або іншим способом фракціонування вихідного матеріалу, і тоді більш ефективним стає спосіб просівання і очищення у водному середовищі в порівнянні з мокрим грохоченням.

**Висновок та напрямок подальших досліджень.** Крім механічного зневоднення промитого заповнювача, здійснюваного за допомогою віджиму, відстоювання, фільтрації, центрофугування, застосуванням грохотів і гідро класификаторів, застосовують методи примусового висушування на заводах і кар'єрах із застосуванням різного роду джерел тепла – газу, інфрачервоного опромінення, електрострумів високої частоти, діелектричної сушки і т.п., а також за допомогою згаданих поверхнево-активних (гідрофобних) речовин, що вводяться з водою при промиванні. Крім мокрих використовують також сухі способи очищення із застосуванням плоских, вібраційних, або барабанного типу грохотів, пульсуючих обезпилювачів. Сухі способи дають матеріал практично сухий і тому не змерзається в зимовий час.

**Список літератури:**

1. Коверніченко Л.М. Заповнювачі для бетону і взаємодія їх з водою. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Випуск 8, Луцьк, 2017. С. 103–110.
2. Kovernichenko L, Shishkin A. Regulation of the influence of the structure of inorganic binders on their properties. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 3/1(41).
3. Штарк Йохен, Вихт Бернд. Долговечность бетона / пер. с нем. А. Тулаганова ; под ред. П. Кривенко, Техн. ред. Е. Кавалеровой. Киев : Оранта, 2004. 301 с.
4. Fredericks J. C., Saunders N. R., Broadfoot J. T. Recent developments in positive displacement shotcrete equipment. Shotcreting, Publication Sp-14 ACI.
5. Ir O. K-, Multiple layer shotcrete tunnel lining. Shotcreting, Publication Sp-14 ACI.
6. Reading T. J. Shotcrete as a construction material. Stfpieretihg, Publication SP-14, ACI.

**Kovernichenko L.M., Syzyi B.S. TECHNOLOGICAL LOCATIONS  
IN THE PREPARATION OF BUILDING MATERIALS**

*The article is devoted to the study of building materials by various methods. When studying the quality indicators of components, new compositions, technological improvements, etc., a single methodological basis can be applied. It consists in the fact that the studied phenomena and characteristics are compared in the appropriate conditions. Often, these comparisons are carried out under equal, and not corresponding, conditions, for example, with equal strength, equal phase composition, the same technological operations, which is equal to the consumption of the component, etc. Meanwhile, such a comparison is legitimate only in a separate case. It has been studied that it is impossible, for example, to draw conclusions about the identity of the quality of two materials with the same strength or other identical properties without taking into account the structural features. It has been proven that the method of solving such a problem from the standpoint of general theory consists in comparing the properties of binders with their optimal structures. And therefore, if a binder with the best quality indicators was found among the compared substances, then according to the law of mandatory matching of properties, it will be the best in the product under the accepted technological conditions and regimes. In addition, the obtained information on property indicators serve as initial data for the further design of an optimal composition that fully meets the specified technical requirements.*

*It was determined that the methodical foundations of the theory also consist in the fact that an unlimited number of optimal compositions can be obtained with the help of the design method. However, at the final stage of design, only one or several rational compositions are selected from many optimal ones, which most fully correspond to specific technological conditions, given by indicators of quality and economic efficiency. Comparison of optimal compositions with each other when choosing a rational one is done according to calculation formulas and graphs-nomograms, which allows you to compare the main characteristics of optimal structures without large experimental studies.*

**Key words:** building materials, characteristics, comparison, choice, structures.

**Корнило І.М.**

Одеська державна академія будівництва та архітектури

## СИСТЕМА МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЖИТЛОВОЇ НЕРУХОМОСТІ

*У статті досліджуються методичні підходи до оцінки житлової нерухомості. В теорії оцінки, ринкову вартість, яка оцінюється, розуміють як найімовірнішу ціну угоди, яку прагне визначити оцінювач. Вона є компромісною між цінами пропозиції та попиту. Відомі підходи до оцінки переважно зорієнтовані або ціну пропозиції, або ціну попиту. Щоб моделювати цей компроміс, при індивідуальній оцінці житлової нерухомості, оцінювачу доводиться застосовувати методи різних підходів та шляхом узгодження отриманих результатів підходити до можливої ціни угоди, тобто, до ринкової вартості.*

*Методи оцінки об'єктів, які застосовуються у будівництві, дають у кінцевому результаті великий розкид даних, що зумовлює великому діапазону результатів оцінки, які потім доводиться коригувати сторонам, що торгують. Ця проблема показує той факт, що не існує механізму справедливої оцінки вартості навіть готової будови, не кажучи про об'єкт житлового будівництва.*

*Методи, що розглядаються в роботах економістів (В. Резніченко, С. Ларіна, Ю. Суханова, В. Клакоцкого), – передбачають оцінку нерухомості на основі єдиного інформаційного підходу, що забезпечує необхідну повноту, взаємозв'язок і універсальність використовуваної системи документації. Основою цієї системи є баланс прогнозованих прибутків і збитків, а також аналітичні матеріали: модель руху грошових коштів, аналіз беззбитковості та аналіз відхилень. Предметом купівлі-продажу на ринку нерухомості і послуг можуть бути комплекти документів: економічних, організаційно-управлінських, технологічних і т.п.*

*У статті відбита розмаїтість варіантів оцінки об'єктів житлової нерухомості, можливість про підвищення ефективності підприємств будівельної галузі. Охарактеризовано загальний рівень розвитку житлової нерухомості в країні й будівельній галузі. Аналізуються можливі доходи: від продажу або передачі нерухомості в оренду, і від експлуатації нерухомості з господарською метою.*

**Ключові слова:** система методичних підходів, оцінка житлової нерухомості, ефективність, будівельна галузь, продаж, оренда та експлуатація нерухомості, страхування, ризик.

**Постановка проблеми.** Ефективне використання організаційно-економічних механізмів розвитку житлової нерухомості стає нагальним питанням для більшості населення нашої держави. Справедливе обурення у людей викликає зростання цін на житло, неплатоспроможність через низькі доходи переважної більшості населення. Дана проблема ґрунтується на припущенні, що для стабільного розвитку інвестицій у ринок нерухомості, особливо в сегмент об'єктів житлового будівництва, потрібне застосування адекватних методів оцінки об'єктів житлового будівництва, що дозволить розрахувати справедливу вартість об'єктів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Діяльність на ринку нерухомості України регулюється Законами України, Постановами Верховної Ради України і Кабінету Міністрів України, методичними вказівками, положеннями, іншими відомчими нормативно-правовими актами, виданими та зареєстрованими у встановленому

порядку центральними та місцевими органами виконавчої влади.

Визначальним документом врегулювання питань фінансування будівництва житла покладений статі Закон України «Про фінансово-кредитні механізми і управління майном при будівництві житла та операціях з нерухомістю» від 19 червня 2003 року. Цей Закон визначає загальні принципи, правові та організаційні засади залучення коштів фізичних і юридичних осіб в управління з метою фінансування масового будівництва житла та особливості управління цими коштами [3].

**Постановка завдання.** На підставі даних літературного огляду сформулювати низку проблем і завдань, які пов'язані зі створенням сучасної системи методичних підходів до оцінки житлової нерухомості. У результаті поставлено завдання щодо оцінки об'єктів. Завдяки дії закону «Про фінансово-кредитні механізми...» у людей, охочих придбати квартиру в новобудові, з'явилася можливість зробити це за допомогою фонду

фінансування будівництва – спеціального рахунку, куди люди вносять гроші на споруду певного будинку, де вони хочуть мати квартири. А розпоряджається даними коштами фінансова структура (керівник), яка виступає посередником між тими, хто хоче вкласти кошти в будівництво житла, і компанією-забудовником. Причому головне завдання керівника – захист інтересів громадян-учасників фонду фінансування будівництва, що довірили йому управління своїми грошима. Тобто керівник повинен належним чином організувати процес будівництва і забезпечити отримання учасниками фонду фінансування будівництва квартир певної якості і в чітко обумовлені терміни. Вартість даних послуг в даний час складає 2-5 відсотків від загальних витрат на зведення будівлі. Певні цифри залежать від самого проекту і встановлюються індивідуально. Керівник фонду фінансування будівництва здійснює нагляд за будівництвом, яке він фінансує. І якщо забудовник не виконує свої зобов'язання при будівництві, керівник має право вимагати повернення всіх грошових коштів або може доручити добудову даного об'єкту іншому забудовнику.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Важливою складовою механізму фонду фінансування будівництва є страхування. Зокрема, страхуються ризики, пов'язані з виконанням будівельно-монтажних робіт. Тобто якщо з будинком щось трапиться в процесі будівництва, страхова компанія відшкодує збиток. Всі учасники фонду фінансування будівництва страхуються і на випадок невчасної здачі будівлі в експлуатацію, а також неякісного виконання будівельно-монтажних робіт. Ну і, нарешті, ще один принциповий момент: страхується ризик недостатнього залучення коштів на будівництво будівлі. Таким чином, якщо забудовнику не вистачатиме грошей на добудову, фінансування продовжуватиме страхова компанія.

Діяльність керівника фонду фінансування будівництва в період будівництва житлового будинку контролює Державна комісія по регулюванню ринків фінансових послуг: керівник щомісячно звітує, скільки грошей зібрано, скільки перераховане забудовнику, скільки грошей той освоїв і т. д.

Важливим для подальшого розвитку ринку житлової нерухомості є оцінка ефективності механізмів, які залучаються до процесу житлового будівництва. Отже, існуючі механізми оцінок об'єктів нерухомості житлового призначення націлені на кінцевий економічний результат, але

при цьому не враховуються резерви ефективності як додаткові аргументи, можливі при використанні різноманітних варіантів оцінки об'єктів. Виходячи з цього, методика оцінки об'єктів нерухомості повинна:

- враховувати соціальну ефективність об'єктів нерухомості з погляду сьогоденних потреб;
- включати місцеві, тимчасові і суб'єктивні особливості об'єкту: тобто матеріальні ресурси, час розробки проекту з погляду нормативної бази, а також можливості репрофілювання, модернізації, реконструкції;
- забезпечувати можливість дослідження допустимості багатоваріантного використання об'єкту в одній системі показників і критеріїв, а також на основі різних критеріїв залежно від стадії життєвого циклу.

Найбільш поширеними є наступні підходи і методи оцінки нерухомості: витратний підхід; дохідний підхід; підхід прямого порівняння продажів (аналогів).

В практиці застосовуються всі три підходи до оцінки, за наслідками яких виводиться остаточна оцінка вартості об'єкту нерухомості. Дана оцінка не повинна бути усередненою, вона залежить від суб'єктивної думки оцінювача, який може вибрати як остаточну величину, наприклад, оцінку поодиноці або за двома методами.

В той же час кожний з цих методів повинен бути доповнений системою загальних критеріїв і локальних показників, заснованих на аналізі, систематизації і класифікації нормативів або (при їх відсутності) узагальненні відповідних показників, що відносяться до часу споруди (проекування) оцінюваного об'єкту або аналога [5,6].

Витратний підхід – базується на припущенні, що покупець не заплатити за готовий об'єкт більше, ніж за створення об'єкту аналогічної корисності, тобто це ринкова ціна, яку необхідно заплатити, аби придбати нерухомість, що характеризується тими ж параметрами і таким же ступенем зносу, як і оцінюване майно.

Витратний підхід складається з таких етапів: оцінка відновної вартості оцінюваної будівлі; оцінка величини підприємницького прибутку (прибутки інвестора); розрахунок виявлених видів зносу; оцінка ринкової вартості земельної ділянки; розрахунок підсумкової вартості об'єкту оцінки шляхом коригування відновленої вартості [2].

В процесі застосування витратного підходу використовується інформація про: рівень заробітної плати; величину накладних витрат; витрати на



устаткування; норми прибутку будівельників в даному регіоні; ринкові ціни на будівельні матеріали.

Перевагами витратного підходу є те що, при оцінці нових об'єктів саме такий підхід є найбільш надійним і є доцільним або єдино можливим при:

- техніко-економічному аналізі вартості нового будівництва;
- аналізі ефективності використання землі;
- вирішенні задач страхування об'єкту;
- вирішенні задач оподаткування;

Недоліки витратного підходу полягають у тому, що:

- витрати не завжди еквівалентні ринковій вартості;
- прагнення до більш точного результату оцінки супроводжуються зростанням витрат праці;
- існує проблематичність розрахунку вартості відтворення старих будов;
- необхідна окрема оцінка земельної ділянки під будовою.

Визначальним моментом вибору методу визначення вартості є точність результатів вартості, отриманих за іншими підходами (доходним та порівняльним), за якими точність визначення вартості складає 15-20%. В цьому випадку підвищення точності при визначенні вартості будівництва за витратним методом стає неадекватним витратам і недоцільним [4].

Слід враховувати також те, що точність оцінки при витратному методі залежить від кваліфікації оцінщика, наявності кошторисно-нормативної бази ціноутворення та нормування будівництва.

Метод (підхід) капітальних доходів (income approach to value) заснований на теоретичному положенні про те, що поточна вартість майна рівна приведеній вартості очікуваних в майбут-

ньому доходів від його експлуатації або продажу. Метод доходів вважається найбільш прийнятним з погляду інвестиційних мотивів, оскільки під вартістю акцій в ньому розуміється не вартість набору активів (будівлі, споруди, машини, устаткування, нематеріальні цінності і т.д.), а оцінка потоку майбутніх доходів. Метод доходів припускає, що потенційний інвестор не заплатить за даний бізнес суму, більшу, ніж поточна вартість майбутніх доходів від цього бізнесу. У межах дохідного підходу розрізняють метод прямої капіталізації та капіталізації за нормою віддачі на капітал. Інвестор, вкладаючи капітал у майно, має на меті отримати дохід за надані грошові кошти та повернути їх.

Загальна норма грошової компенсації (норма доходу) за вкладений капітал складається з норми прибутку (віддачі) на капітал та норми повернення капіталу. Норма, яка складається з прибутку (поточна віддача) на капітал, є компенсацією за цінність грошей за фактором часу, ризиків та інших факторів, що пов'язані з конкретним капіталом (грошовими інвестиціями), тобто це процент за користування капіталом (табл. 1).

Норма доходу відображає залежність між річним доходом, що випадає на певний інтерес, та вартістю частини власності, що відноситься до даного інтересу.

До норм доходу відносять коефіцієнти капіталізації (табл. 2):

В основі методу капіталізації лежить принцип очікування майбутніх вигод протягом періоду економічного існування. Тобто, з моменту придбання, власник реалізує свої майнові права, отримуючи вигоду (доходи) від його існування на двох етапах:

- використання нерухомого майна (отримання доходів від володіння ним);

Таблиця 1

**Норми віддачі (прибутку)**

Норми віддачі		
Процента	$Y_m$	Застосовується до позикового капіталу і визначається відношенням вартості плати за використання кредиту до суми кредиту
Дисконту	$Y$	Застосовується до власного капіталу для переведення майбутніх платежів або надходжень в теперішню (поточну на дату оцінки) вартість
Внутрішня	$IRR$	Дисконтує значення усіх майбутніх вигод та прирівнює їх теперішню вартість до вартості початкових інвестицій
Загальна	$Y_o$	Норма віддачі на весь інвестований капітал. Враховує зміну загального доходу упродовж періоду володіння та у кінці володіння. Проте, не враховує ефект позикового фінансування; доцільно розглядати як об'єднану норму на позиковий та власний капітал
Власного капіталу	$Y_E$	Враховує дохід, отриманий від вартості всіх майбутніх вигод, який випадає на власний капітал упродовж всього строку володіння, включаючи реверсію

\* – розроблено автором за джерелами [1; 4].

## Норми доходу

Норми доходу (коефіцієнт капіталізації)		
Загальний	$Y_m$	Для всього капіталу Відношення між ЧОД за рік та загальною вартістю або ціною власності
Власного капіталу	$Y$	Відношення річного грошового доходу до виплати податків до власного капіталу
Позикового капіталу	$IRR$	Відношення суми за обслуговування боргу за рік до основної суми кредиту
Землі	$Y_o$	Відношення річного грошового доходу від орендної плати за землю (або доходу, що приходиться на землю) до вартості землі
Будівель	$Y_E$	Відношення частини річного доходу, що приходиться на будівлю до вартості будівлі

\* – розроблено автором за джерелами [1; 4]

• ліквідація (у розумінні перепродажу у кінці строку володіння та отримання доходу від продажу) нерухомого майна.

Вибір певного методу залежить від обсягу наявної ринкової інформації щодо очікуваних доходів від володіння (користування) нерухомим майном, стабільності їх одержання, мети оцінки тощо.

Капіталізація доходу – процес перерахунку майбутніх доходів у загальну суму теперішньої (поточної на дату оцінки) їх вартості [4].

Базова формула доходного підходу (1):

$$C = \frac{ЧД}{K} \quad \text{або} \quad V = \frac{I}{R} \quad (1)$$

$C(V)$  – вартість нерухомості;

$ЧД(I)$  – очікуваний дохід від оцінюваної нерухомості. Під доходом мається на увазі чистий операційний дохід, який здатна приносити нерухомість за період;

$K(R)$  – норма доходу або прибутку – це коефіцієнт або ставка капіталізації.

При застосуванні цього методу необхідно враховувати такі умови, як нестабільність потоків доходів та перебування нерухомості в стадії реконструкції або незавершеного будівництва.

Основні проблеми даного методу полягають у тому, що його, по-перше, не слід використовувати, якщо об'єкт нерухомості потребує значної реконструкції або знаходиться в стані незавершеного будівництва, тобто, коли немає чіткого уявлення про реальний вихід на рівень стабільності доходів. І, по-друге, коли існує інформаційна непрозорість ринку нерухомості, тобто, коли відсутня інформація по реальних угодах продаж і оренди об'єктів нерухомості, експлуатаційних витратах, відсутня статистична інформація по коефіцієнту завантаження на кожному сегменті ринку в різних регіонах.

Метод непрямой капіталізації доходу застосовується у випадках, коли прогнозовані грошові потоки від використання об'єкта нерухомості є неоднаковими за величиною або непостійними протягом періоду прогнозування.

Грошовий потік – показник досягнутих результатів як для самого власника, так і для зовнішніх сторін і контрагентів – клієнтів, кредиторів, постачальників і т.д., оскільки відображає постійну наявність певних грошових коштів на рахунках власника.

Порівняльний підхід до оцінки – це сукупність методів оцінки вартості, заснованих на порівнянні об'єкту оцінки з аналогами, відносно яких є інформація про ціни операцій з ними.

Процес використання цього методу досить простий: підбирається об'єкт нерухомості аналогічний оцінюваному об'єкту, який вже має відому ринкову ціну; потім після порівняння їх техніко-економічних параметрів фіксуються відмінності і вносяться відповідні поправки у вартісному вигляді, визначається базова вартість.

З позицій порівняльного підходу раціональний покупець не заплатить за об'єкт нерухомості більше, ніж ціна об'єкта аналогічної корисності. Підхід порівняльного аналізу продаж – це метод оцінки ринкової вартості нерухомого майна на підставі даних про нещодавні угоди [4].

Процес узгодження результатів оцінки включає попередню і завершальну стадії.

У завершальній стадії оцінювач наново повертається до початкової проблеми, за допомогою статистичного аналізу, виробляє вірогідні величини вартості об'єкту, визначає її очікувані граничні значення. Потім з урахуванням свого досвіду і знань представляє замовнику єдину суму оцінки вартості нерухомості.

Підхід до оцінки вартості на основі порівняння продажів ґрунтується на прямому порівнянні

оцінюваного об'єкту з іншими об'єктами нерухомості, які були продані або включені в реєстр на продаж. Покупці часто засновують свої висновки про вартість головним чином на об'єктах нерухомості, пропонувані на продаж. Оцінювачі також використовують цю інформацію поруч з відомостями про продані або здані в оренду об'єктах.

Цей підхід заснований на принципі заміщення, який свідчить: за наявності декількох товарів або послуг схожої придатності, той з них, який має найнижчу ціну, має найбільший попит і має найширше розповсюдження. Стосовно житла це означає: якщо на ринку його може бути відмічено (що звичайно і відбувається), то його вартість звичайно встановлюється на рівні витрат на придбання житла рівного ступеня привабливості, що не знадобиться багато часу на здійснення заміни.

Масова оцінка нерухомості – це спеціальний підхід до спрощеної оцінки великої групи однорідних об'єктів (квартир). Така оцінка проводиться по певній методиці: для оцінюваного об'єкту визначається відповідний набір значень фіксованої безлічі його параметрів, а потім за незмінними для всіх об'єктів правилами формується значення його оцінки.

**Висновки.** Для підвищення точності оцінки слід прагнути до того, щоб розрахункові величини були повною мірою підтверджені фактичними даними. Ми вважаємо що необхідно використати

кваліметричний підхід, сутність якого полягає в тому, щоб врахувати фактори непрямих ознак як частки цілого тобто ціни квартири. Найчастіше до цих факторів відносять: місце розташування квартири (місто, район, віддаленість житла від торгових центрів, поверх), тип будинку (панельний, цегляний та ін.), рівень шуму та додаткові «цінності» житла (будинок нової споруди, якість ремонту, стан комунікацій, наявність балкону або лоджії, вид з вікна, якість підвір'я, близькість або відсутність автостоянки, зупинок громадського транспорту, незадовільний стан будівлі і під'їзду, та ін.). Ці фактори можуть змінюватися залежно від соціальних та кліматичних умов, розвитку будівництва та надання комунальних послуг. При цьому варто мати на увазі, що чим більше враховується факторів, тим більше точним виявиться результат. Складність методів оцінки житлової нерухомості викликана специфічними особливостями, такими, як тривалістю будівництва і довгостроковістю функціонування житлової нерухомості, а також високою вартістю. Ці особливості впливають на вибір інформаційних джерел при оцінці нерухомості і на алгоритм оціночних процедур.

Об'єктивне визначення вартості житла є необхідною передумовою регіонального розвитку житлової нерухомості. Оцінка житла дає змогу виявити особливості експертних і нормативних оцінок його стану.

#### Список літератури:

1. Асаул А.М., Брижань І.А., Чевганова В.Я. Економіка нерухомості : підручник. Київ: «Лібра», 2004. 304 с.
2. Асаул А.М., Павлов В.І., Пилипенко І.І., Павліха Н.В., Кривов'язюк І.В. Ринок нерухомості : навч. посібник. Київ : Кондор, 2006. 336 с.
3. Закон України «Про фінансово-кредитні механізми і управління майном при будівництві житла та операціях з нерухомістю» від 19 червня 2003р. № 978 – IV. *Урядовий кур'єр*. 2003 р., 2 липня, с. 4.
4. Воротіна Л.І., Воротін В.Є., Лісняк В.Г., Поліщук В.М. Оцінка майна в Україні. *Нерухоме майно*. Київ : Вид-во Європ. ун-ту, 2005. Том 1. 217 с.
5. Чалий І. Довірче управління коштами в системі фінансування будівництва. Харків : Фактор, 2007. 400 с.
6. Чистов Л.М. Экономика строительства. СПб : Питер. 2001. 384 с.

#### Kornylo I.M. SYSTEM OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF RESIDENTIAL REAL ESTATE

*The article investigates methodological approaches to the valuation of residential real estate. In valuation theory, the market value being valued is understood as the most probable transaction price that the valuer seeks to determine. It is a compromise between supply and demand prices. Known approaches to valuation are mainly focused on either the supply price or the demand price. To model this trade-off, in the individual assessment of residential real estate, the appraiser has to apply methods of different approaches and by coordinating the results to approach the possible price of the transaction, ie. to market value. The valuation methods used in construction ultimately give a large scatter of data, resulting in a wide range of valuation results, which then have to be adjusted by the trading parties. This problem shows the fact that there is no mechanism for a fair assessment of the cost of even the finished building, not to mention the object of housing*

*construction. The methods considered in the works of economists (V. Reznichenko, S. Larina, Y. Sukhanov, V. Klakotsky) – provide for the assessment of real estate on the basis of a single information approach that provides the necessary completeness, interconnection and universality of the documentation system used. The basis of this system is the balance of projected profits and losses, as well as analytical materials: cash flow model, break-even analysis and analysis of deviations. The subject of purchase and sale in the real estate market and services may be sets of documents: economic, organizational and managerial, technological, etc. The article reflects the variety of options for assessing residential real estate, the possibility of improving the efficiency of construction companies. The general level of development of residential real estate in the country and construction industry is characterized. Possible incomes are analyzed: from the sale or transfer of real estate for rent, and from the operation of real estate for economic purposes.*

**Key words:** *system of methodical approaches, estimation of residential real estate, efficiency, construction branch, sale, rent and operation of real estate, insurance, risk.*

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/46>**Луценко Ю.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Добряк Д.О.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Кравченко Н.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Цимбалістий С.З.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Савченко О.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ ПИЛОПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ У ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ

У даній статті висвітлено особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху пилоповітряних сумішей у виробничих приміщеннях. Визначення категорій приміщень і будинків за вибухопожежною та пожежною небезпекою провадять відповідно нормативного документу [1]. Категорію визначають для встановлення вимог щодо забезпечення вибухопожежної та пожежної безпеки приміщень, будинків та зовнішніх установок стосовно планування і забудови, поверховості, площ, розташування приміщень, конструктивних рішень, інженерного устаткування та систем протипожежного захисту. У розрахунку враховують кількість та властивості пожежовибухонебезпеки речовин і матеріалів, що знаходяться в об'ємі даного приміщення або будинку, особливості технологічних процесів виробництва та об'ємно-планувальних рішень, наявності технічних засобів, що запобігають виникненню аварійних ситуацій. Існує два підходи щодо визначення маси горючого пилу, що потрапив у повітря приміщення в результаті аварії. У даній статті розглянуто обидва підходи на прикладі визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні пилорозробного відділення. Наведено пояснення щодо застосування цих підходів під час визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші. Слід зазначити, що вибух пилу завжди створює умови для переходу пилу з поверхонь обладнання, стін, підлоги у зважений стан. Це приводить до утворення вибухонебезпечних концентрацій в об'ємі всього приміщення. Для горючих пилів аварійний об'єм можна вважати таким, що дорівнює вільному об'єму приміщення.

Аварійну масу пилу, яка може перейти у стан аерозолу, доцільно визначати після розрахунку стехіометричної концентрації горючого пилу у повітрі, виходячи з умови, що об'єм аварійної хмари дорівнює вільному об'єму приміщення [3; 5].

Для визначення стехіометричної концентрації горючого пилу складного елементного складу слід проводити розрахунок кількості повітря, необхідного для згорання маси пилу, що внаслідок аварії перейшов у стан аерозолу. Слід зауважити, що наведені підходи не поширюється на будинки та приміщення, призначені для виробництва, зберігання і утилізації вибухових речовин і засобів підривань, а також зовнішні установки для їх виробництва.

**Ключові слова:** надлишковий тиск вибуху, стехіометрична концентрація, розрахунковий об'єм пилоповітряної хмари, розрахункова маса горючого пилу.

**Постановка проблеми.** Вимоги до визначення категорій приміщень і будинків виробничого та складського призначення, лабораторій, а також зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою залежно від кількості й пожежовибухонебезпечних властивостей речовин і матеріалів, що в них знаходяться, з урахуванням особливостей

технологічних процесів виробництва та об'ємно-планувальних рішень, наявності технічних засобів, що запобігають виникненню аварійних ситуацій, установлює нормативний документ [1].

Категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок, які визначені відповідно до цього стандарту, слід використовувати для встановлення

вимог щодо забезпечення вибухопожежної та пожежної безпеки зазначених приміщень, будинків та зовнішніх установок стосовно планування і забудови, поверховості, площ, розташування приміщень, конструктивних рішень, інженерного устаткування та систем протипожежного захисту.

У розділі 7.3 [1] наведено порядок розрахунку надлишкового тиску вибуху пилоповітряних сумішей. Сформульовано два підходи щодо визначення маси горючого пилу, що потрапив у повітря приміщення в результаті аварії.

Однак вибір певного підходу до розрахунку маси горючого пилу, що потрапив у повітря приміщення в результаті аварії, потребує певного уточнення.

**Формування цілі статті.** Метою даної статті є уточнення щодо застосування цих підходів [1] під час визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проаналізовано питання розрахунку надлишкового тиску вибуху у приміщеннях, в яких обертається велика кількість горючого пилу за двома підходами згідно з вимогами [1], що розглядалося в посібниках [3; 5]. Але обґрунтування вибору методики для певного об'єкту потребують подальших досліджень.

**Викладення основного матеріалу.** У даній статті розглядаються особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші за двома підходами зазначеними вище.

Розрахунок надлишкового тиску вибуху для горючого пилу  $\Delta P$  у кілопаскалях обчислюють за формулою:

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_0 \cdot Z}{V_{\text{вільн}} \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot C_p \cdot T_0} \cdot \frac{1}{K_n} \quad (1)$$

де  $m$  – маса горючого пилу, що потрапила в результаті розрахункової аварії до приміщення і яку визначають за формулою (2), кг;

$H_T$  – теплота згоряння, Дж·кг<sup>-1</sup>;

$P_0$  – атмосферний тиск, кПа (дозволено приймати таким, що дорівнює 101,3 кПа);

$Z$  – коефіцієнт участі у вибуху, який може бути розрахований за формулою (3). Дозволено приймати значення  $Z$  відповідно до таблиці 2 [1].

$V_{\text{вільн}}$  – вільний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{пов}}$  – густина повітря до вибуху за початкової температури  $T_0$ , кг·м<sup>-3</sup>;

$C_p$  – теплоємність повітря, Дж·(кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>) (дозволено приймати рівною  $1,01 \cdot 10^3$  Дж·(кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>);

$T_0$  – початкова температура повітря, К.

Масу горючого пилу, що потрапила в результаті розрахункової аварії до приміщення, визначають за формулою:

$$m = \min \left\{ \begin{array}{l} m_{\text{вз}} + m_{\text{ав}} \\ \rho_{\text{см}} V_{\text{ав}} / Z \end{array} \right. , \quad (2)$$

де  $m_{\text{вз}}$  – розрахункова маса частини відкладеного у приміщенні пилу, що перейшов у стан аерозолі, кг;

$m_{\text{ав}}$  – розрахункова маса горючого пилу, що потрапив до об'єму приміщення з апарата у результаті розрахункової аварії та перейшов у стан аерозолі, кг;

$\rho_{\text{см}}$  – стехіометрична концентрація горючого пилу в аерозолі, кг·м<sup>-3</sup>;

$V_{\text{ав}}$  – розрахунковий об'єм пилоповітряної хмари, утвореної при аварійній ситуації в об'ємі приміщення, м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт участі пилу в завислому стані (стані аерозолі), у вибуху,  $Z$ , розраховують за формулою:

$$Z = 0,5 \cdot M_{\text{кр}} \quad (3)$$

де  $M_{\text{кр}}$  – масова частка частинок пилу розміром менше критичного. З перевищенням критичного розміру частинок пилу аерозоль стає вибухобезпечною, а саме такою, що не здатна поширювати полум'я. У разі відсутності даних щодо масової частки частинок пилу розміром менше критичного дозволено приймати  $Z = 0,5$ .

Для визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші за формулою (1) приймають мінімальну масу пилу, отриману в результаті розрахунків двома способами [1] за формулою (2).

Спробуємо застосувати формулу (2) для визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні, в якому обертається значна кількість горючого пилу складного елементного складу. У приміщенні пилопідготовчого відділення об'ємом 32 000 м<sup>3</sup> обертається значна кількість кам'яного вугілля, що перероблюють у пил. Внаслідок аварії у повітря приміщення відбувається викидання вугільного пилу.

Визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні пилопідготовчого відділення.

Розрахункову масу пилу, що знаходиться у стані аерозолі у вільному об'ємі приміщення пилоприготувального відділення в результаті аварійної ситуації,  $m$ , кг, визначають за формулою:

$$m = m_{\text{зв}} + m_{\text{ав}} \quad (4)$$

Розрахункову масу пилу відкладеного на поверхнях, що перейшов у стан аерозолі,  $m_{\text{зв}}$ , визначають за формулою:

$$m_{зв} = K_{зв} + m_n, \quad (5)$$

де  $K_{зв}$  – частка пилу, що відклалася у приміщенні, яка здатна перейти у стан аерозолу в результаті аварійної ситуації. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення  $K_{зв}$  допускається приймати  $K_{зв} = 0,9$ ;

$m_n$  – маса пилу, що відклалася у приміщенні до моменту аварії, кг і яка за вихідними даними становить 100 кг.

Розрахункову масу пилу, що потрапила до приміщення з апарата або технологічного обладнання в результаті аварійної ситуації,  $m_{ав}$ , визначають за формулою :

$$m_{ав} = (m_{ап} + q \cdot \tau) \cdot K_{п}, \quad (6)$$

де  $m_{ап}$  – маса горючого пилу, що викидається до приміщення з апарата, кг;

$q$  – витрата, з якою продовжують надходити пилоподібні речовини до аварійного апарата по трубопроводах до моменту їх перекивання,  $кг \cdot с^{-1}$ ;

$\tau$  – час перекивання, який визначається за пунктом 7.1.2 в), с [1];

$K_{п}$  – коефіцієнт пилення, що представляє собою відношення маси пилу у стані аерозолу до усієї маси пилу, який надійшов з апарата до приміщення. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення  $K_{п}$  допускається приймати:

для пилу з дисперсністю не менше ніж 350 мкм  $K_{п} = 0,5$ ;

для пилу з дисперсністю менше ніж 350 мкм  $K_{п} = 1,0$ .

У даному випадку  $m_{ав}$  дорівнює масі горючого рилу, що містився в продувному бункері (апараті). а коефіцієнт пилення для вугільного пилу, враховуючи, що дисперсність його менше 350 мкм, становить  $K_{п} = 1,0$ .

Приймаємо, що аварія сталася у продувному бункері, коли він перебував в одному з п'яти режимів, а саме в режимі «очікування». В результаті розгерметизації продувного бункеру ємністю 70 м<sup>3</sup> в об'єм пилоприготовувального відділення надійшла значна кількість вугільного пилу.

За вихідними даними маса пилу, що відкладається у приміщенні до моменту аварії за добу становить 100 кг. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення  $K_{зв}$  приймаємо  $K_{зв} = 0,9$ .

Розрахункову масу відкладеного у цеху пилу, що перейшов у стан аерозолу,  $m_{зв}$ , визначаємо за формулою (5):

$$m_{зв} = 0,9 \cdot 100 = 90 ,$$

За вихідними даними насипна густина вугільного пилу становить 700 кг/м<sup>3</sup>, заповненість ємності становить 0,8.

Маса горючого пилу, що потрапляє у повітря приміщення з продувного бункеру (апарата) становить:

$$m_{ап} = 0,8 \cdot 700 \cdot 70 = 39200 \text{ (кг)}$$

Маса пилу, що надійшла у приміщення в результаті аварії, за формулою (6), становить:

$$m_{ав} = 39200 \cdot 1 = 39200 \text{ (кг)},$$

Розрахункову масу пилу, що знаходиться у стані аерозолу у пилоприготовувальному приміщенні в результаті аварійної ситуації,  $m$ , кг, визначають за формулою (4):

$$m = 90 + 39\ 200 = 39\ 290 \text{ (кг)}$$

Геометричний об'єм приміщення пилопідготовчого відділення становить 32000 м<sup>3</sup>. Приймаємо, що вільний від обладнання об'єм приміщення становить 50% від геометричного, і становить, відповідно, 16 000 м<sup>3</sup>.

Визначаємо надлишковий тиск вибуху за формулою (1):

$$\Delta P = \frac{39290 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 101 \cdot 0,5}{16000 \cdot 1,2 \cdot 1010 \cdot 293} \cdot \frac{1}{3} = 3492 \text{ (кПа)}$$

Маса вугільного пилу, що бере участь у вибуху з урахуванням, що коефіцієнт  $Z=0,5$ , становить 19 645,0 кг. Надлишковий тиск вибуху в приміщенні будівлі пилоприготовувального відділення у разі аварії становить 3492,0 кПа.

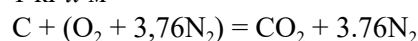
Розрахунок об'єму повітря, необхідного для згорання речовини складного елементного складу.

Склад речовин складного елементного складу, у даному приміщенні це вугільний пил, представлений у масових долях ( $\omega, \%$ ) кожного елемента. За даними [2] елементний склад кам'яного вугілля такий: вуглець (с) – 79,4%, водень (Н) – 5,3%, кисень (О) – 10,3%, сірка (S) – 2,82%, зола – 2,18%.

При горінні кисень повітря витрачається на окиснення вуглецю С, водню Н, сірки S та інших горючих складових. Розрахуємо, який теоретичний об'єм повітря необхідний для згорання 1 кг кожного елемента за нормальних умов. Для цього скористаємося методикою, викладеною в [2; 4] і запишемо у рівнянні всі відомі та невідомі величини та виведемо пропорцію для вуглецю, водню та сірки.

Визначаємо об'єм повітря для згорання 1 кг вуглецю:

$$1 \text{ кг} \times \text{м}^3$$



$$12 \text{ кг} \cdot 4,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3$$

$$V_n(C)^{теор} = x = \frac{4.76 \cdot 22.4}{12} = 8,885 \text{ м}^3$$

Визначаємо об'єм повітря для згорання 1 кг водню:

$$1 \text{ кг } x \text{ м}^3$$

$$H + 0.25(O_2 + 3.76N_2) = 0.5H_2O + 0.25 \cdot 3.76N_2$$

$$1 \text{ кг } 0.25 \cdot 4.76 \cdot 22.4 \text{ м}^3$$

$$V_n(H)^{теор} = x = \frac{0.25 \cdot 4.76 \cdot 22.4}{1} = 26.656 \text{ м}^3$$

Визначаємо об'єм повітря для згорання 1 кг сірки:

$$1 \text{ кг } x \text{ м}^3$$

$$S + (O_2 + 3.76N_2) = SO_2 + 3.76N_2$$

$$32 \text{ кг } 4.76 \cdot 22.4 \text{ м}^3$$

$$V_n(S)^{теор} = x = \frac{4.76 \cdot 22.4}{32} = 3.332 \text{ м}^3$$

Вуглець, водень та сірка є основними складовими більшої органічних сполук. Значна кількість органічних речовин мають у своєму складі кисень, і, отже, повітря на горіння буде витрачено менше. Розрахуємо об'єм повітря, у якому міститься 1 кг кисню.

$$32 \text{ кг } O_2 - 4.76 \cdot 22.4 \text{ м}^3 \text{ повітря}$$

$$1 \text{ кг } - x \text{ м}^3$$

$$V_n(O)^{теор} = x = \frac{4.76 \cdot 22.4}{32} = 3.332 \text{ м}^3$$

Теоретичний об'єм повітря для згорання заданої маси (m) речовини складного елементного складу за нормальних умов визначається за формулою:

$$V_n^{теор} = m \cdot 0.267 \cdot \left( \frac{\omega(C)}{3} + \frac{\omega(S)}{8} + \omega(H) - \frac{\omega(O)}{8} \right) \text{ м}^3/\text{кг} \quad (7)$$

Теоретичний об'єм повітря для згорання заданої маси (m) речовини, у нашому випадку це 39 290 кг вугільного пилу за формулою (7) становить:

$$V_n^{теор} = 39290 \cdot 0.267 \cdot \left( \frac{79.4}{3} + \frac{2.82}{8} + 5.3 - \frac{10.3}{8} \right)$$

$$= 350 459,04 \text{ (м}^3\text{)}$$

Відповідно, теоретичний об'єм повітря для згорання 1 кг вугільного пилу за формулою (7) становить:

$$V_n^{теор} = 1 \cdot 0.267 \cdot \left( \frac{79.4}{3} + \frac{2.82}{8} + 5.3 - \frac{10.3}{8} \right) = 8.92 \text{ (м}^3\text{)}$$

За даними [2] коефіцієнт надлишку повітря для кам'яного вугілля даного елементного складу становить 1,3. З огляду на коефіцієнт надлишку повітря реально на згорання 1 кг вугільного пилу буде витрачено повітря в об'ємі 11,6 м<sup>3</sup>.

З огляду на вищенаведене реальний об'єм повітря, необхідного для згорання 39290 кг вугільного пилу становить 455 764 м<sup>3</sup>, що значно перевищує вільний об'єм виробничого приміщення.

Визначення стехіометричної концентрації пилоповітряної суміші.

За попередніми розрахунками на згорання 1 кг вугільного пилу теоретично потрібно 8,92 м<sup>3</sup>. Відповідно, стехіометрична концентрація вугільного пилу становить 0,112 кг/м<sup>3</sup>.

Визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні пилопідготовчого відділення за формулою (2) з урахуванням стехіометричної концентрації вугільного пилу.

Для вказаного розрахунку має бути визначений об'єм пилоповітряної хмари, що представляється неможливим. Слід зазначити, що вибух пилу завжди створює умови для переходу пилу з поверхонь обладнання, стін, підлоги у зважений стан. Це приводить к утворенню вибухонебезпечних концентрацій в об'ємі всього приміщення. Для горючих пилів аварійний об'єм можна вважати таким, що дорівнює вільному об'єму приміщення.

З огляду на вищенаведене маса вугільного пилу, що перейшла у стан аерозолу і бере участь у вибуху, за другим рівнянням згідно з формулою (2) становить:

$$m = \frac{\rho_{cm} \cdot V_{аб}}{Z} = 3584 \text{ кг}$$

Для подальшого розрахунку з отриманих значень вугільного пилу, що перейшов у стан аерозолу, останнє значення є мінімальним.

Визначаємо надлишковий тиск вибуху у приміщенні пилопідготовчого відділення за формулою (1)

$$\Delta P = \frac{3584 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 101 \cdot 0.5}{16000 \cdot 1.2 \cdot 1010 \cdot 293} \cdot \frac{1}{3}, = 318.5 \text{ (кПа)}$$

### Висновки.

На конкретному прикладі розглянуто особливості визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряних сумішей.

Таким чином, у приміщеннях, де обертається горючий пил і де у разі аварії, можливе потрапляння значної кількості горючого пилу (сотні або тисячі кг), аварійну масу пилу,  $m_{ав}$ , яка може перейти у стан аерозолу, доцільно визначити після розрахунку стехіометричної концентрації горючого пилу у повітрі, виходячи з умови, що об'єм аварійної хмари дорівнює вільному об'єму приміщення [3; 5].

Для визначення стехіометричної концентрації горючого пилу складного елементного складу слід проводити розрахунок кількості повітря, необхідного для згорання маси пилу, що внаслідок аварії перейшов у стан аерозолу.



Слід зазначити, що документ [1] описує порядок визначення надлишкового тиску дефлаграційного вибуху.

У приміщеннях, лінійні розміри яких (довжина, ширина, висота) відрізняються один від одного більше ніж у 10 разів і у приміщеннях, із значною

захарашеністю будівельними конструкціями і обладнанням дефлаграційне вибухове горіння може переходити у детонаційне [6–8], відповідно, застосування положень документа [1] щодо визначення надлишкового тиску вибуху для даних приміщень потребує подальшого дослідження.

#### Список літератури:

1. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
2. Портола В.А. Расчет процессов горения и взрыва : учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцева, Е.С. Торосян. Томск, 2012. 108 с.
3. Корольченко А.Я. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности / Александр Яковлевич Корольченко, Дмитрий Олегович Загорский. М. : Изд-во «Пожнаука», 2010. 118 с. Ил.
4. Хворенкова А.Ж. Теория горения и взрыва: Сб. задач. Екатеринбург : Изд.-во УрГУПС, 2014. 80 с.
5. Посібник по практичному застосуванню ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. 2017.
6. Расчет параметров легкосбрасываемых конструкций для взрывопожароопасных помещений промышленных объектов : рекомендации. М. : ВНИИПО, 2015. 48 с.
7. Пожарная профилактика в строительстве / под редакцией В.Ф. Кудаленкина. Высшая инженерная техническая школа МВД СССР, 1985. 447 с.
8. Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2000. 224 с.

**Lutsenko Yu.V., Dobriak D.O., Kravchenko N.V., Tsybalistiy S.Z., Savchenko O.V.**

#### **PECULIARITIES OF CALCULATION OF EXCESS EXPLOSION PRESSURE OF DUST-AIR MIXTURES IN PRODUCTION PREMISES**

*This article highlights the features of the calculation of the excess pressure of the explosion of dust-air mixtures in production facilities. Determination of categories of premises and buildings by explosion and fire hazard is carried out in accordance with the normative document [1]. The category is determined to establish the requirements for explosion and fire safety of premises, buildings and outdoor installations in relation to planning and construction, storeys, areas, location of premises, design solutions, engineering equipment and fire protection systems. The calculation takes into account the number and properties of fire and explosion substances and materials in the volume of the room or house, the peculiarities of technological processes of production and spatial planning solutions, the availability of technical means to prevent emergencies. There are two approaches to determining the mass of combustible dust that enters the room as a result of an accident. This article considers both approaches on the example of determining the excess explosion pressure in the room of the dust preparation department. An explanation of the application of these approaches in determining the excess pressure of the explosion of the dust-air mixture is given. It should be noted that the explosion of dust always creates conditions for the transition of dust from the surfaces of equipment, walls, floors in a suspended state. This leads to the formation of explosive concentrations throughout the room. For combustible saws, the emergency volume can be considered equal to the free volume of the room.*

*The emergency mass of dust, which can turn into an aerosol, should be determined after calculating the stoichiometric concentration of combustible dust in the air, based on the condition that the volume of the emergency cloud is equal to the free volume of the room [3; 5].*

*To determine the stoichiometric concentration of combustible dust of a complex elemental composition, it is necessary to calculate the amount of air required for the combustion of the mass of dust, which as a result of the accident went into aerosol. It should be noted that these approaches do not apply to buildings and premises intended for the production, storage and disposal of explosives and explosives, as well as outdoor installations for their production.*

**Key words:** *excess explosion pressure, stoichiometric concentration, calculated volume of dust-air cloud, calculated mass of combustible dust.*

**Семичаєвський С.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Присяжнюк В.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Якіменко М.Л.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Осадчук М.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Свірський В.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## **ПРО СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО КЛАСИФІКАЦІЇ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ПОЖЕЖНИКІВ, ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ, МЕТОДІВ І ПРОЦЕДУР ЇХ ОЦІНЮВАННЯ**

*У статті наведено актуальність впровадження в Україні сучасних вимог до класифікації засобів індивідуального захисту пожежників, показників якості, методів і процедур їх оцінювання. Акцентовано увагу на необхідності реалізації вимог Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд з метою забезпечення безпечності рятувальних команд під час гасіння пожеж.*

*Зазначено, що проведені раніше дослідження не містять даних стосовно досліджень щодо встановлення класифікації, вимог до показників якості засобів індивідуального захисту пожежників, удосконалення методів і процедур їх оцінювання.*

*Вказано, що в ході науково-дослідної роботи за темою «Захисне спорядження – показники якості» в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту на теперішній час розроблено першу редакцію проєкту національного стандарту України ДСТУ XXXX:202\_Засоби індивідуального захисту пожежників. Класифікація, технічні вимоги та методи випробування. Наведено загальну структуру проєкту стандарту. Вказано сферу застосування проєкту стандарту.*

*Зазначено нові терміни, які вжиті у проєкті стандарту, та визначення позначених ними понять.*

*Розкрито розділ стандарту «Класифікація, типи та будова засобів індивідуального захисту», в якому наведено вимоги щодо класів, типів та основних конструктивних елементів засобів індивідуального захисту пожежників.*

*Розкрито розділ стандарту «Відбирання та кондиціонування зразків», в якому передбачено вимоги щодо відбирання та кондиціонування зразків засобів індивідуального захисту пожежників.*

*Також розкрито розділ стандарту «Загальні технічні вимоги та методи випробувань засобів індивідуального захисту пожежників», в якому наведено таблиці, що містять загальні технічні вимоги та методи випробувань всіх вищенаведених видів засобів індивідуального захисту пожежників. В якості прикладу, в статті наведено відповідні таблиці для підкасника пожежника, захисного одягу пожежника та захисних рукавичок для пожежників.*

*За результатами проведених досліджень у публікації зроблено відповідні висновки.*

**Ключові слова:** засоби індивідуального захисту пожежників, захисне взуття, захисний одяг пожежника, захисні рукавички для пожежників, каска пожежника, методи випробувань, підкасник пожежника, показники якості, тепловідбивний захисний одяг.

### **Вступ**

Під час ліквідації надзвичайних ситуацій, пожеж та їх наслідків підрозділи ДСНС України працюють в специфічній обстановці, яка обу-

мовлюється несприятливими факторами, що впливають на них. Небезпечні фактори пожежі представляють собою прояви, що призводять чи можуть призвести до опіку, отруєння леткими

продуктами згорання або травмування чи загибелі людей, заподіяння матеріальних та інших збитків. До небезпечних факторів пожежі належать: підвищена температура, задимлення, погіршення складу газового середовища.

На сьогоднішній день для виконання завдань за призначенням підрозділами ДСНС України використовується низка різних (як за технічними характеристиками так і за типом) засобів індивідуального захисту пожежників, які не завжди можуть захистити пожежника від дії тих або інших небезпечних факторів, які виникають на пожежі. До таких засобів відносяться: захисний одяг пожежника різних типів та видів залежно від теплового навантаження, каска пожежника, підкашник, захисне взуття та захисні рукавички для пожежників.

В Україні є чинними національні стандарти, які поширюються на засоби індивідуального захисту пожежників, а саме: ДСТУ EN 443:2017 [1], ДСТУ EN 15090:2017 [2], ДСТУ EN 13911:2015 [3], ДСТУ EN 659:2017 [4], ДСТУ EN 469:2017 [5], ДСТУ EN 1486:2010 [6].

Треба відмітити, що вищенаведені національні стандарти встановлюють лише мінімальні технічні вимоги та методи випробування з визначення показників якості таких засобів, які не в повній мірі відображають реальні умови їх використання, що є недостатнім для виявлення недоброякісної продукції, що потрапляє на оснащення у ці підрозділи. Як наслідок це приводить до тяжких травм чи загибелі пожежників під час гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій.

Згідно з пунктом 6.2 а) ДСТУ 1.8:2015 [7] національні нормативні документи розробляють на основі міжнародних нормативних документів, якщо їх уже прийнято або вони перебувають на завершальній стадії розроблення, або відповідних їхніх частин, крім випадків, якщо такі міжнародні документи неефективні чи невідповідні, зокрема з огляду на недостатній рівень захисту, суттєві кліматичні чи географічні чинники або технологічні проблеми.

В рамках науково-дослідної роботи за темою «Обґрунтування показників якості і методів оцінювання спеціального захисного спорядження пожежника» (код теми: «Захисне спорядження – показники якості») в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (далі – ІДУ НД ЦЗ) проведено експериментальні дослідження зразків таких засобів, які показали, що:

– існуючі методи випробувань не в повній мірі розкривають вимоги щодо процедур підготовки зразків до випробувань та їх необхідної кількості;

– зміст методів випробувань не містить чіткої інформації щодо необхідності проведення випробувань окремих елементів засобів індивідуального захисту пожежників;

– окремі методи випробувань потребують змін та доповнень в частині оцінки результатів випробувань.

Крім того, потребують змін та доповнень:

– назви деяких методів випробувань;

– посилання на європейські стандарти, які втратили чинність;

– процедура кондиціонування зразків тощо.

Враховуючи викладене вище, для недопущення застосування таких неякісних засобів індивідуального захисту з метою сприяння збереженню життя та здоров'я особового складу пожежно-рятувальних підрозділів під час виконання завдань за призначенням, необхідно розробити обґрунтовані вимоги до засобів індивідуального захисту та удосконалити відповідні методи випробувань.

Вищезазначене обумовлює актуальність впровадження в Україні сучасних вимог до класифікації засобів індивідуального захисту пожежників, показників якості, методів і процедур їх оцінювання. Це необхідно для реалізації вимог *Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд* з метою забезпечення безпечності рятувальних команд під час гасіння пожеж.

#### **Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

У звіті [8] наведено результати пошукової науково-дослідної роботи з визначення шляхів удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання.

В той же час ця робота не містить досліджень щодо встановлення класифікації, вимог до показників якості засобів індивідуального захисту пожежників, удосконалення методів і процедур їх оцінювання.

#### **Мета та завдання дослідження**

**Метою дослідження** є удосконалення вимог до якості засобів індивідуального захисту пожежників для збереження життя та здоров'я особового складу пожежно-рятувальних підрозділів під час виконання завдань за призначенням.

Завданням статті є викладення основних положень проекту національного стандарту, що

встановлює класифікацію, вимоги до показників якості засобів індивідуального захисту пожежників, методи і процедури їх оцінювання.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

В ході науково-дослідної роботи за темою «Захисне спорядження – показники якості» в ІДУ НД ЦЗ на теперішній час розроблено першу редакцію проекту національного стандарту України ДСТУ ХХХХ:202\_Засоби індивідуального захисту пожежників. Класифікація, технічні вимоги та методи випробування, який має таку загальну структуру:

- Передмова;
- Зміст;
- Сфера застосування;
- Нормативні посилання;
- Терміни та визначення понять;
- Класифікація, типи та будова засобів індивідуального захисту пожежників;
- Відбирання та кондиціонування зразків;
- Загальні технічні вимоги та методи випробувань;
- Маркування;
- Додатки.

Згідно зі «Сферою застосування» стандарт установлює загальні вимоги до класифікації, технічних вимог та методів випробувань засобів індивідуального захисту пожежників, до яких відносяться: каска пожежника, підкасник пожежника, захисний одяг пожежника, захисні рукавички, захисне взуття та тепловідбивний захисний одяг.

Цей стандарт не стосується засобів індивідуального захисту, які призначені для специфічного захисту від інших небезпек, зокрема, хімічних, біологічних, радіологічних та електричних небезпек.

Крім того, у «Сфері застосування» вказано, що метод комплексного оцінювання засобів індивідуального захисту пожежника під час проведення натурних вогневих випробувань буде передбачено в окремо розробленому національному стандарті України.

У розділі «Терміни та визначення понять» подано такі нові терміни, вжиті в цьому стандарті, та визначення позначених ними понять, а саме:

#### **засіб індивідуального захисту пожежника**

Спеціальне захисне спорядження, що надягається на тіло пожежника або його частину і застосовується під час гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт.

#### **комплект спеціального захисного спорядження пожежника**

Сукупність засобів індивідуального захисту, які призначені для захисту тіла пожежника (голова, тулуб, руки та ноги) та застосовуються ним під

час гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт.

#### **каска пожежника**

Спеціальне захисне спорядження призначене для захисту голови пожежника від ударів, впливу небезпечних факторів пожежі та вогнегасних речовин під час гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт.

#### **підкасник пожежника**

Спеціальне захисне спорядження, яке одягається під каску пожежника та призначене для захисту шиї та голови, а також деяких ділянок обличчя від впливу небезпечних факторів пожежі та вогнеганих речовин під час гасіння пожеж та пожежно-рятувальних робіт.

#### **захисний одяг пожежника**

Спеціальне захисне спорядження призначене для захисту тіла пожежника від впливу небезпечних факторів пожежі та вогнегасних речовин під час гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт.

#### **рукавички пожежника**

Спеціальне захисне спорядження призначене для захисту кисті та рук пожежника від механічних пошкоджень, впливу небезпечних факторів пожежі та вогнегасних речовин під час гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт.

#### **захисне взуття пожежника**

Спеціальне захисне спорядження призначене для захисту ніг пожежника від механічних пошкоджень, впливу небезпечних факторів пожежі та вогнегасних речовин під час гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт.

#### **теповідбивний захисний одяг пожежника**

Спеціальне захисне спорядження, яке використовується в сукупності з іншим спорядженням та призначене для захисту пожежника під час гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт в умовах високої температури навколишнього середовища, інтенсивного теплового випромінювання та тривалої дії відкритого полум'я.

У розділі стандарту «Класифікація, типи та будова засобів індивідуального захисту» наведено вимоги щодо класів, типів та основних конструктивних елементів засобів індивідуального захисту пожежників.

Наприклад, стосовно каски пожежника стандарт поширюється на такі класи каски пожежника згідно з розділом 6 ДСТУ EN 443 [1]:

За низькою температурою:

- “\*” – для виробів, які відповідають відповідним вимогам щодо тих, які призначено для експлуатації за температури –10 °С;

– “\*\*” – для виробів, які відповідають відповідним вимогам щодо тих, які призначено для експлуатації за температури –20 °С;

– “\*\*\*” – для виробів, які відповідають відповідним вимогам щодо тих, які призначено для експлуатації за температури –30 °С;

– “\*\*\*\*” – для виробів, які відповідають відповідним вимогам щодо тих, які призначено для експлуатації за температури –40 °С.

За електроізоляційними властивостями (якщо заявлено відповідність):

– E2 для виробів, які відповідають вимогам 4.12.2 ДСТУ EN 443 [1];

– E3 для виробів, які відповідають вимогам 4.12.3 ДСТУ EN 443 [1].

Стандарт поширюється на два типи касок: тип А і тип В. Вибір типу каски і додаткових засобів потрібно здійснювати після всебічного оцінювання ризику згідно з ДСТУ EN 443 [1].

До основних конструктивних елементів каски пожежника згідно з розділом 3 ДСТУ EN 443 [1] відносяться:

– корпус каски, який являє собою компонент, виготовлений з твердого матеріалу з рівним покриттям, що надає касці її загальну форму;

– поглинач енергії каски, який являє собою матеріал та/або підвісний пристрій, що слугує для амортизації удару;

– натяжна система каски, яка являє собою елементи, що відповідають за закріплення каски на місці її розташування на голові, у тому числі пристрої, що забезпечують можливість налаштування або підвищення комфорту;

– підборідний ремінь каски, який являє собою елемент натяжної системи, у тому числі ремінь, що проходить під підборіддям особи, яка носить

каска, що допомагає забезпечити правильність обслуговування каски в місці її експлуатації;

– потиличний кожух каски, який являє собою елемент, що захищає шию (ділянку 3а згідно з розділом 3 ДСТУ EN 443 [1]) від рідин, нагрітих матеріалів, променистої теплоти та полум’я;

– пристрій для захисту обличчя, який являє собою елемент, що захищає принаймні частину обличчя, яку визначено як ділянку 2;

– щитки для захисту вух, які являють собою елемент каски, що захищає принаймні вуха особи, яка носить її.

Каска пожежника може бути оснащена додатковими елементами, наприклад, кронштейнами для закріплення ліхтаря, кабельними затисками, знаками розрізнення і накладками тощо.

У розділі «Відбирання та кондиціонування зразків» стандарту передбачено вимоги щодо відбирання та кондиціонування зразків засобів індивідуального захисту пожежників.

Наприклад, стосовно відбирання зразків взуття пожежника стандарт передбачає, що мінімальна кількість зразків взуття має бути такою, як зазначено в розділі 6 ДСТУ EN ISO 20344 [9], до цієї кількості має входити також мінімальна кількість фрагментів для випробування, відібраних від кожного зі зразків, як наведено в таблиці 1.

Фрагменти для випробування за можливості потрібно відбирати від цілої одиниці взуття, крім випадків, в ДСТУ EN 15090 [2] та в ДСТУ EN ISO 20344 [9] зазначено інше.

Кожний фрагмент для випробування має відповідати конкретній вимозі, якщо методом випробування не передбачено іншого.

Якщо від одиниці взуття неможливо відібрати фрагмент для випробування достатнього розміру,

Таблиця 1

**Мінімальна кількість зразків та елементів взуття для випробування**

Показник якості, який потрібно визначити*	Посилання на пункт	Кількість зразків	Кількість фрагментів для випробування, що відбирають від кожного із зразків	Випробуванню потрібно піддавати тільки готову одиницю взуття
Теплове випромінювання	6.3.2	1 пара	Див. 7.2 ДСТУ EN 15090 [2]	Так
Вплив полум’я	6.3.3	1 пара	Див. 7.3 ДСТУ EN 15090 [2]	Так
Опір підноско стисканню	6.4	1 пара кожного з трьох розмірів	1 пара	Так
Сила кріплення брелока застібки	6.8.2	3 застібки		Ні
Стійкість застібки до дії поперечної сили	6.8.3	3 застібки		Ні

\* Застосовна таблиця 1 ДСТУ EN ISO 20344 [9]

то замість нього дозволено використовувати зразок матеріалу, з якого виготовлено компонент, і це необхідно зазначити в протоколі випробування.

Якщо зразки потрібно відбирати від виробів кожного з трьох розмірів, то їх потрібно відбирати від одиниць взуття, яке піддають випробуванню, найбільшого, найменшого та середнього розміру.

Стосовно кондиціонування зразків взуття пожежника стандарт передбачає, що усі фрагменти для випробування перед його проведенням потрібно кондиціонувати у стандартній атмосфері за температури  $(23+2)$  °C і відносної вологості повітря  $(50+5)$  % упродовж не менше ніж 48 год, якщо в описі методу випробування не зазначено іншого.

Максимальний проміжок часу від моменту вилучення зразка з атмосфери для кондиціонування до початку випробування має бути не більше ніж 10 хв, якщо методом випробування не передбачено інше.

Кожний фрагмент для випробування має відповідати конкретній вимозі, якщо методом випробування не передбачено іншого.

В розділі стандарту «Загальні технічні вимоги та методи випробувань засобів індивідуального

захисту пожежників» наведено таблиці, що містять загальні технічні вимоги та методи випробувань всіх вищенаведених видів засобів індивідуального захисту пожежників.

Стосовно каски пожежника стандарт передбачає загальні технічні вимоги та методи випробувань, які можна сгрупувати за такими напрямками, а саме: «механічні небезпеки», «термічні небезпеки», «електроізоляційні властивості», «контактування з рідкими хімічними речовинами (необов'язкова вимога)», «поле зору», «повнота зору».

Стосовно підкасника пожежника стандарт передбачає загальні технічні вимоги та методи випробувань до матеріалу, пакету матеріалів, з яких виготовляється підкасник пожежника, які можна сгрупувати за такими напрямками, а саме: «вимоги до одношарового матеріалу з якого виготовляється підкасник пожежника», «вимоги до двошарового пакету матеріалів з якого виготовляється підкасник пожежника», «вимоги до трьохшарового пакету матеріалів з якого виготовляється підкасник пожежника», «вимоги до матеріалу підкладкового шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляється підкасник пожежника».

Таблиця 2

**Вимоги до двошарового пакету матеріалів з якого виготовляється підкасник пожежника**

№ п/п	Назва методу випробування	Нормативний документ, за яким проводиться випробування	Вимоги до показників якості підкасника пожежника
1	Поверхнева густина	ДСТУ EN 12127 [10]	визначається фактично для кожного матеріалу шару окремо
2	Поширення полум'я – на суцільному зразку; – на зразку зі швом; – на кожному матеріалі окремо	ДСТУ EN ISO 15025 [11] (метод А)	Індекс обмеження поширення полум'я 3
3	Теплопередача полум'я	ДСТУ EN ISO 9151 [12]	$HTI_{24} \geq 15,0$ с; $HTI_{24-12} \geq 4,0$ с
4	Теплопередача випромінювання за густини теплового потоку $20$ кВт/м <sup>2</sup>	ДСТУ EN ISO 6942 [13] (метод В)	$RHTI_{24} \geq 25,0$ с; $RHTI_{24-12} \geq 4,0$ с
5	Теплостійкість кожного матеріалу окремо за температури $(260^{+10})$ °C, протягом 5 хвилин	ДСТУ ISO 17493 [14]	зразок не повинен плавитись, капати, займатися та не повинен давати усадку більше ніж на 10 % в напрямку вздовж та поперек волокон
6	Розривальне зусилля шва	ДСТУ EN ISO 13938-1 [15]	не менше ніж 450 кПа
7	Зміна лінійних розмірів після прання та сушіння	ДСТУ ISO 5077 [16] (EN 5077)	Зразок, що випробовується не повинен давати усадку більше ніж на 5% у напрямку вздовж і поперек волокон
8	Залишкова межа міцності на розрив матеріалу верху в умовах впливу теплового випромінювання $10$ кВт/м <sup>2</sup>	ДСТУ EN ISO 6942 [13] (метод А) ДСТУ EN ISO 13938-1 [15]	не менше ніж 300 кПа

Як приклад, в таблиці 2 наведено вимоги до двошарового пакету матеріалів з якого виготовляється підкащик пожежника.

Стосовно захисного одягу пожежника стандарт передбачає загальні технічні вимоги та методи випробувань до пакету матеріалів, матеріалів та фурнітури, з яких виготовляється захисний одяг для пожежників, які можна сгрупувати за такими напрямками, а саме:

- вимоги до пакету матеріалів з якого виготовляється захисний одяг пожежника;
- вимоги до матеріалу термостійкого шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляється захисний одяг пожежника;
- вимоги до матеріалу водотривкого шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляється захисний одяг пожежника;
- вимоги до матеріалу теплоізоляційного шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляється захисний одяг пожежника;
- вимоги до матеріалу підкладкового шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляється захисний одяг пожежника;
- вимоги до зносостійкого матеріалу для ліктьових, колінних, плечових накладок та вставок для запобігання дії бруду, рідин на елементи захисного одягу пожежника;
- вимоги до матеріалу для перешкоджання потрапляння вологи на теплоізоляційний та підкладковий шари захисного одягу пожежника;
- вимоги до матеріалу для напульсників по низу рукавів захисного одягу пожежника;
- вимоги до сигнальних смуг захисного одягу пожежника;
- вимоги до застібок-«блискавок» (центральної бортової та пуфт) захисного одягу пожежника;
- вимоги до структурних швів захисного одягу пожежника.

В таблиці 3, в якості прикладу, наведено вимоги до матеріалу підкладкового шару, що входить до

пакету матеріалів з якого виготовляється захисний одяг пожежника.

Стосовно рукавичок пожежника стандарт передбачає загальні технічні вимоги та методи випробувань до готового зразка рукавичок, пакету матеріалів долонної і тильної частин рукавички та матеріалів, з яких виготовляються захисні рукавички для пожежників, які можна сгрупувати за такими напрямками, а саме:

- вимоги до готового зразка захисних рукавичок для пожежників;
- вимоги до пакету матеріалів долонної частини захисних рукавичок для пожежників;
- вимоги до пакету матеріалів тильної частини захисних рукавичок для пожежників;
- вимоги до матеріалів долонної частини, стрілки вказівного пальця та стрілки мізинця захисних рукавичок для пожежників;
- вимоги до матеріалу тильної частини захисних рукавичок для пожежників;
- вимоги до матеріалу водотривкого шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляються захисні рукавички для пожежників;
- вимоги до матеріалу теплоізоляційного шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляються захисні рукавички для пожежників;
- вимоги до матеріалу підкладкового шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляються захисні рукавички для пожежників».

В таблиці 4 в якості прикладу наведено вимоги до матеріалу водотривкого шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляються захисні рукавички для пожежників.

Стосовно взуття пожежника стандарт передбачає загальні технічні вимоги та методи випробувань з урахуванням його типів та класів, які можна сгрупувати за такими напрямками, а саме:

- загальні вимоги (конструкція взуття);
- взуття в цілому (вимоги до підошви);

Таблиця 3

**Вимоги до матеріалу підкладкового шару, що входить до пакету матеріалів з якого виготовляється захисний одяг пожежника**

№ п/п	Назва методу випробування	Нормативний документ, за яким проводиться випробування	Вимоги до показників якості захисного одягу для пожежників, який відповідає 1-му рівню захисту	Вимоги до показників якості захисного одягу для пожежників, який відповідає 2-му рівню захисту
1	Поверхнева густина	ДСТУ EN 12127 [10]	визначається фактично	
2	Поширення полум'я	ДСТУ EN ISO 15025 [11] (метод А)	Індекс поширення полум'я 3 згідно з ДСТУ EN ISO 14116 [17]	
3	Теплостійкість за температури (180 ± 45) °С, протягом 5 хвилин	ДСТУ ISO 17493 [14]	зразок не повинен обвуглюватись, руйнуватись або займатися та не повинен давати усадку більше ніж на 5 % в напрямку вздовж та поперек волокон	

**Вимоги до матеріалу водотривкого шару, що входить до пакету матеріалів,  
з якого виготовляються захисні рукавички для пожежників**

№ п/п	Назва методу випробування	Нормативний документ, за яким проводиться випробування	Вимоги до показників якості захисних рукавичок для пожежників
1	Поверхнева густина	ДСТУ EN 12127 [10]	визначається фактично
2	Теплостійкість за температури (260 ± 5) °С, протягом 5 хвилин	ДСТУ ISO 17493 [14]	зразок не повинен плавитись, утворювати краплин або займатися та не повинен давати усадку більше ніж на 5 % в напрямку вздовж та

- взуття в цілому (вимоги до захисту пальців);
- взуття в цілому (електричні властивості взуття);
- взуття в цілому (стійкість до дії несприятливого середовища взуття);
- взуття в цілому (вимоги до допоміжних елементів);
- вимоги до верху взуття;
- підкладка (вимоги до передньої частини взуття);
- підкладка (вимоги до берців);
- вимоги до язичка;
- вимоги до вкладишів устілки;
- вимоги до зовнішньої поверхні підошви».

Стосовно тепловідбивного захисного одягу пожежника стандарт передбачає загальні технічні вимоги та методи випробувань до пакету матеріалів, матеріалів та фурнітури з яких він виготовляється, які можна сгрупувати за такими напрямками, а саме:

- вимоги до пакету матеріалів, з якого виготовляється тепловідбивний одяг пожежника (куртка, штани);
- вимоги до пакету матеріалів, з якого виготовляється капюшон тепловідбивного одягу пожежника;
- вимоги до пакету матеріалів з якого виготовляються бахіли (основна частини та ступені) тепловідбивного одягу пожежника;
- вимоги до пакету матеріалів з якого виготовляються рукавиці (верхня та долонна частини) тепловідбивного одягу пожежника;

- вимоги до матеріалу термостійкого шару (куртка, штани, капюшон, бахіли, рукавиці) тепловідбивного одягу пожежника;
- вимоги до матеріалу теплоізоляційного шару (куртка, штани, капюшон, бахіли, рукавиці) тепловідбивного одягу пожежника;
- вимоги до матеріалу підкладкового шару (куртка, штани, капюшон, бахіли, рукавиці) тепловідбивного одягу пожежника;
- вимоги до маски (оглядовий екран) тепловідбивного одягу пожежника;
- вимоги до складових елементів системи замикання (блискавки, кнопки, гачки) тепловідбивного одягу пожежника.

Крім того, стандарт містить розділ «Маркування» та 6 обов'язкових додатки, які стосуються перевірки основних ергономічних показників кожного із видів засобів індивідуального захисту.

#### **Висновки**

1. Встановлено сучасні вимоги до класифікації засобів індивідуального захисту пожежників, показників якості, методів і процедур їх оцінювання.

2. Після затвердження наказом національного органу стандартизації викладений вище проєкт національного стандарту буде застосовуватись виробниками засобів індивідуального захисту пожежників під час підтвердження їх якості, а також сприятиме впровадженню у практичну роботу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України сучасних і надійних цих засобів.

#### **Список літератури:**

1. ДСТУ EN 443:2017 (EN 443:2008, IDT). Засоби індивідуального захисту голови. Каски пожежні. Київ, 2017. 41 с.
2. ДСТУ EN 15090:2017 (EN 15090:2012, IDT). Взуття для пожежників. Київ, 2019. 34 с.
3. ДСТУ EN 13911:2015 (EN 13911:2004, IDT). Захисний одяг для пожежників. Вимоги та методи випробування протипожежних капюшонів для пожежників. Київ, 2016. 13 с.
4. ДСТУ EN 659:2017 (EN 659:2003+A1:2008, IDT). З поправкою № 1:2017. Захисні рукавички для пожежників. Загальні технічні вимоги та методи випробування. Київ, 2017. 12 с.
5. ДСТУ EN 469:2017 (EN 469:2005; A1:2006; AC:2006, IDT). Захисний одяг для пожежників. Вимоги щодо показників якості захисного одягу для пожежників. Київ, 2018. 27 с.
6. ДСТУ EN 1486:2010 (EN 1486:2007, IDT). Одяг захисний для пожежників. Методи випробування та вимоги до відбивального одягу пожежників. Київ, 2012. 32 с.



7. ДСТУ 1.8:2015. Національна стандартизація. Правила розроблення програми робіт з національної стандартизації. Київ, 2016. 25 с.
8. Провести пошукові дослідження та визначити шляхи удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання: звіт про НДР (заключний). / кер. О.П. Борис. Київ: УкрНДІПЗ, 2016. 784 с.
9. ДСТУ EN ISO 20344:2016 (EN ISO 20344:2011, IDT; ISO 20344:2011, IDT). Засоби індивідуального захисту. Методи випробування взуття. Київ, 2016. 66 с.
10. ДСТУ EN ISO 12127-1:2018 (EN ISO 12127-1:2015, IDT; ISO 12127-1:2015, IDT). Одяг для захисту від тепла та полум'я. Визначення контактної теплопередачі через захисний одяг або його складові матеріали. Частина 1. Контактна теплопередача від нагрівального циліндра. Київ, 2020. 18 с.
11. ДСТУ EN ISO 15025:2016 (EN ISO 15025:2002, IDT; ISO 15025:2000, IDT). Одяг захисний. Захист від тепла та полум'я. Метод випробування на обмежене поширення полум'я. Київ, 2016. 17 с.
12. ДСТУ EN ISO 9151:2018 (EN ISO 9151:2016, IDT; ISO 9151:2016, IDT). Одяг для захисту від тепла та полум'я. Визначення теплопередачі під дією полум'я. Київ, 2018. 27 с.
13. ДСТУ EN ISO 6942:2018 (EN ISO 6942:2002, IDT; ISO 6942:2002, IDT). Одяг захисний. Захист від тепла та вогню. Метод випробування. Оцінювання матеріалів і комбінацій матеріалів, що піддаються дії джерела теплового випромінювання. Київ, 2018. 27 с.
14. ДСТУ ISO 17493:2018 (ISO 17493:2016, IDT). Одяг і засоби захисту від високих температур. Метод визначення конвективної теплостійкості за допомогою печі з циркуляцією гарячого повітря. Київ, 2018. 17 с.
15. ДСТУ ISO 13938-1:2007 (ISO 13938-1:1999, IDT). Матеріали текстильні. Властивості тканин щодо розривання. Частина 1. Гідралічний метод визначення опору розриванню та розтягуванню на момент розривання. Київ, 2009. 10 с.
16. ДСТУ ISO 5077-2001 (ISO 5077:1984, IDT). Матеріали текстильні. Метод визначення зміни лінійних розмірів після прання та сушіння. Київ, 2003. 7 с.
17. ДСТУ EN ISO 14116:2016 (EN ISO 14116:2015, IDT; ISO 14116:2015, IDT). Одяг захисний. Захист від полум'я. Матеріали, пакети матеріалів та одяг, що обмежують поширення полум'я. Київ, 2016. 15 с.

**Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V., Svirskiy V.V. ON MODERN REQUIREMENTS FOR CLASSIFICATION OF MEANS OF INDIVIDUAL PROTECTION OF FIREFIGHTERS, QUALITY INDICATORS, METHODS AND PROCEDURES FOR THEIR EVALUATION**

*The article presents the relevance of the introduction in Ukraine of modern requirements for the classification of personal protective equipment for firefighters, quality indicators, methods and procedures for their evaluation. Emphasis is placed on the need to implement the requirements of the Technical Regulations for construction products, buildings and structures in order to ensure the safety of rescue teams during firefighting.*

*It is noted that previous studies do not contain data on studies to establish the classification, the requirements for quality indicators of personal protective equipment for firefighters, improving methods and procedures for their evaluation.*

*It is indicated that in the course of research work on "Protective equipment – quality indicators" at the Institute of Public Administration and Research in Civil Protection currently developed the first version of the draft national standard of Ukraine DSTU XXXX: 202\_Means of individual protection of firefighters. Classification, technical requirements and test methods. The general structure of the draft standard is given. The scope of the draft standard is indicated.*

*The new terms used in the draft standard and the definitions of the concepts indicated by them are indicated.*

*A section of the standard "Classification, types and structure of personal protective equipment" is disclosed, which provides requirements for classes, types and basic structural elements of personal protective equipment for firefighters.*

*The section of the standard "Sampling and conditioning of samples", which provides requirements for sampling and conditioning of samples of personal protective equipment for firefighters.*

*The section of the standard "General technical requirements and methods of testing personal protective equipment for firefighters" is also disclosed, which contains tables containing general technical requirements and test methods for all the above types of personal protective equipment for firefighters. As an example, the article provides relevant tables for firefighter's boot, firefighter's protective clothing and protective gloves for firefighters.*

*According to the results of the research, the publication draws the appropriate conclusions.*

**Key words:** *firefighter's booster, firefighter's helmet, heat-reflective protective clothing, personal protective equipment for firefighters, protective clothing for firefighters, protective footwear, protective gloves for firefighters, quality indicators, test methods.*

**Чичуліна К.В.**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АРМОВАНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК

*Метою експериментальних досліджень, представлених в статті є дослідження роботи, визначення несучої здатності та характеру руйнування складених армованих склопластиковою арматурою дерев'яних балок зі стінкою з OSB з цілісними поясами та їх порівняння. Об'єктом дослідження є клеєні армовані склопластиковою арматурою дерев'яні бали двотаврового перерізу із стінкою з OSB та цілісними поясами перекриття і покриття будівель та споруд. Для досягнення поставленої мети було виготовлено шість складених клеєних армованих склопластиковою арматурою дерев'яних балок двотаврового перерізу із стінкою з OSB та цілісними поясами. Перші дві балки виготовлені з одиночним армуванням зверху та знизу, друга та третя балки з подвійним армуванням зверху та знизу, п'ята з симетричним одиночним армуванням та шоста з симетричним подвійним, для дослідження їх роботи при статичних навантаженнях. Також було виготовлено шість балок з такими ж параметрами, але меншого розміру для порівняння прогинів від завантаження однією силою. Згідно з прийнятою методикою проведення експериментальних досліджень несучої здатності й деформативності клеєних балок, вимірювання деформацій проводились при обпиранні зразка на дві опори при завантаженні у двох точках на відстані 900 мм від опор. Руйнування двотаврових балок даного типу відбувається в результаті розриву стінки від дії дотичних напружень, руйнування полицки у розтягнутій зоні та зсуву стінки по клейовому шву. Враховуючи те, що руйнування полицки в розтягнутій зоні починалося з сучка бруса, необхідно забезпечити відсутність таких дефектів в зоні дії максимального згинального моменту при виробництві клеєних дерев'яних балок. При виготовленні конструкцій особливу увагу слід приділити якості виконання клейового з'єднання стінки з поясами балки та при симетричному армуванні рекомендовано збільшити глибину пазів для збільшення площі клейового шва. Це забезпечить надійне склеювання і деформації зсуву між стінками та полицями будуть відсутні.*

**Ключові слова:** дерев'яні балки, OSB, експеримент, руйнування, міцність, навантаження.

**Постановка проблеми.** Виробництво і застосування дерев'яних клеєних конструкцій знаходяться на етапі динамічного сталого розвитку. Тимчасові параметри цього етапу, умови стійкості розвитку, тенденції та пріоритети в забезпеченні динаміки темпів – ці та інші завдання вимагають системного аналізу та програмного рішення. Виробництво дерев'яних клеєних конструкцій будівельного призначення було розпочато в середині минулого століття. Ці конструкції є відповідальними елементами будівельних систем будівель і споруд, можуть сприймати великі експлуатаційні навантаження і забезпечують стійкість і безпеку будівельних об'єктів. Тому саме цим дерев'яним клеєним конструкціям приділяється найбільша увага, особливо у науково-технічній та нормативно-методичній сферах, отже актуальність обраної теми не викликає сумніву.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У статті [1] авторами подано опис запропонованого та запатентованого конструктивного рішення армованих подвійних балок зі стінкою з орієнтованої стандартної дошки, яка була виго-

товлена з двох дошок із поперечним перекриттям 38 x 65 мм. Перетин і стінка 10 мм x 200 мм з орієнтованої стандартної плити (орієнтована стандартна плита – OSB), яка з'єднана епоксидним клеєм, висота бруса 250 мм. Проведено аналіз результатів експерименту запропонованих двотаврів із скловолоконним армуванням, виявлено особливості роботи під навантаженням та режим руйнування. У роботі [2] пропонується новий метод прогнозування граничної несучої здатності конструкційних балок з виїмками, що піддаються розколюванню. У роботі [3] досліджено поведінку дерев'яної рами з врізними з'єднаннями врізношпорових та з'єднаннями опори колони при поперечному навантаженні. Запропоновано аналітичну модель для плоского нещільного з'єднання на основі співвідношення навантаження-зміщення. Досліджено механічну поведінку цих нещільних з'єднань з фрикційно-ковзним контактним механізмом з чіткими доказами негативної жорсткості в бічній опорі дерев'яної рами. У роботі [4] досліджуються два скінченно елементні рішення, розроблені для аналізу поперечної вигину

на скручування дерев'яних балок-настилів, що складаються з двох балок, скріплених настилом через кріплення. Обидва рішення забезпечують гнучкість обертання, що забезпечується з'єднаннями між дошками та балками. На основі проведеного аналізу було виявлено, що дослідження представлених у роботі подальших дерев'яних конструкцій вимагають його вивчення та експериментального підтвердження експлуатації.

**Постановка завдання.** Метою експериментальних досліджень, представлених в статті є дослідження роботи, визначення несучої здатності та характеру руйнування складених армованих склопластиковою арматурою дерев'яних балок зі стінкою з OSB з цілісними поясами та їх порівняння. Об'єктом дослідження є клеєні армовані скло-пластиковою арматурою дерев'яні бали двотаврового перерізу із стінкою з OSB та цілісними поясами перекриття і покриття будівель та споруд. Для досягнення поставленої мети було виготовлено шість складених клеєних армованих склопластиковою арматурою дерев'яних балок двотаврового перерізу із стінкою з OSB та цілісними поясами. Дослідження базуються на експериментальних методиках і підходах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для перших чотирьох серій згідно з прийнятою методикою проведення експериментальних досліджень несучої здатності й деформативності клеєних балок, вимірювання деформацій проводились при обпиранні зразка на дві опори при завантаженні у двох точках на відстані 900 мм від опор. Проаналізуємо роботу зразків першої серії при статичних навантаженнях та їх руйнування. До першого зразка БКА-В1 прикладалося навантаження з кроком 2 кН з однаковою швидкістю до 10 кН. До другого зразка БКА-Н1 навантаження прикладалося до втрати несучої здатності зразка, яке відбулась в результаті руйнування стінки з OSB

внаслідок дії дотичних напружень (рис. 1, а). Похила тріщина утворилась в місці прикладання навантаження. Руйнування має крихкий характер. Руйнуюче навантаження склало 18 кН. Візуалізація прогинів балки перед руйнуванням представлено на рис.1, б. Загалом оцінювання результатів всього випробування проведено за формулами: 1. Експериментальні прогини балки визначаються за відліками прогиноміра  $\Pi$  за залежністю:  $f_{\text{екс}} = \Delta\Pi$ ; 2. Експериментальні значення напружень визначаються за законом Гука  $\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i$ .

В результаті вимірювань тензорезисторами, наклеєними на деревині по геометричній осі елементів конструкції, отримані графіки залежності деформацій (рис. 2) та напружень (рис. 3) від навантаження.

Отримані графіки залежності деформацій для балки БКА-Н1 (рис. 4) та напружень (рис. 5) від навантаження.

Визначимо характер роботи зразків другої серії при статичних навантаженнях та їх руйнування. Друга серія зразків випробувалася за тією ж методикою проведення експериментальних досліджень несучої здатності й деформативності клеєних балок, вимірювання деформацій проводились при обпиранні зразка на дві опори при завантаженні у двох точках на відстані 900 мм від опор. До першого зразка БКА-Н2 прикладалося навантаження з кроком 2 кН кг з однаковою швидкістю до 8 кН. До другого зразка БКА-В2 навантаження прикладалося до втрати несучої здатності зразка, яка відбулась в результаті руйнування стінки з OSB внаслідок дії дотичних напружень (рис. 6, а). Похила тріщина утворилась в прольоті зрізу ближче до місця прикладання навантаження під кутом нахилу 45°. Після руйнування стінки відбувся розрив нижнього поясу балки. Руйнування мало крихкий характер. Руйнуюче навантаження склало 15 кН, прогини балки зображені на рис. 6, б.



а



б

Рис. 1.

а – Руйнування першої серії зразків; б – Прогин балки перед руйнуванням

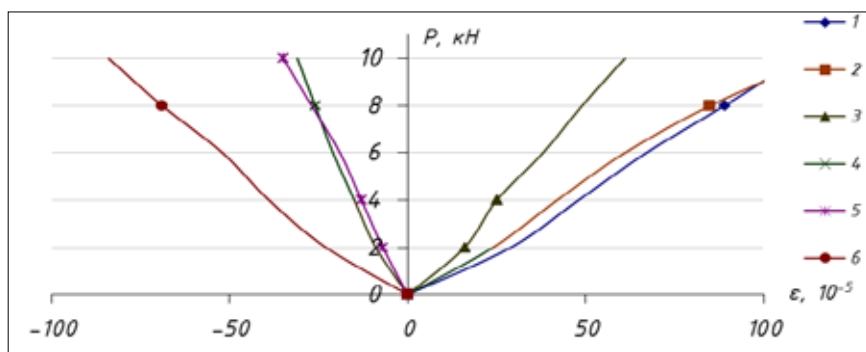


Рис. 2. Відносні деформації зразка БКА-В1

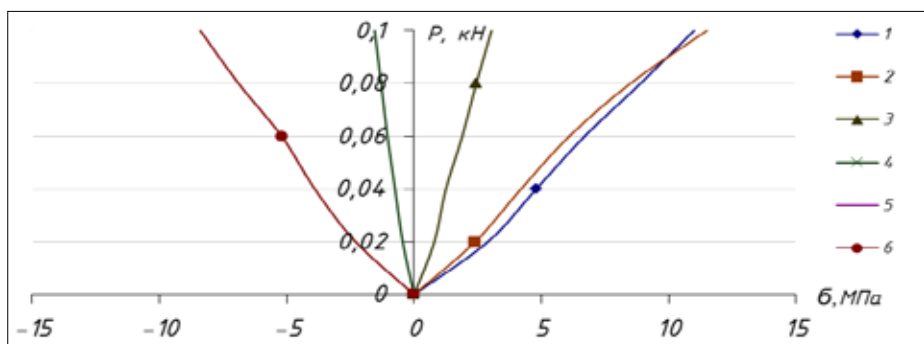


Рис. 3. Напруження в точках розташування тензодатчиків зразка БКА-В1

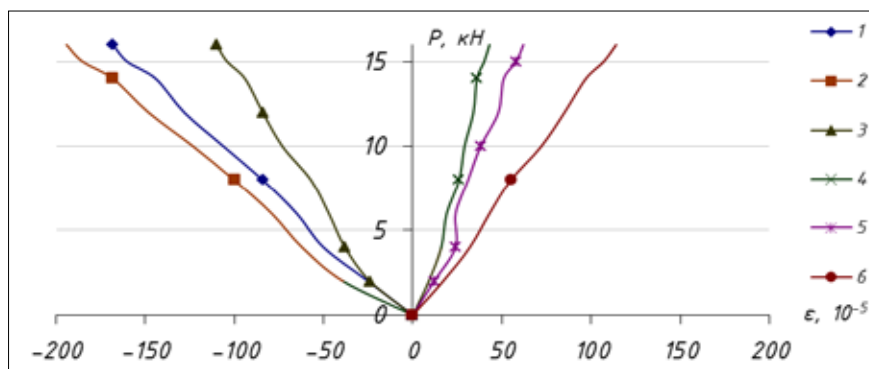


Рис. 4. Відносні деформації зразка БКА-Н1

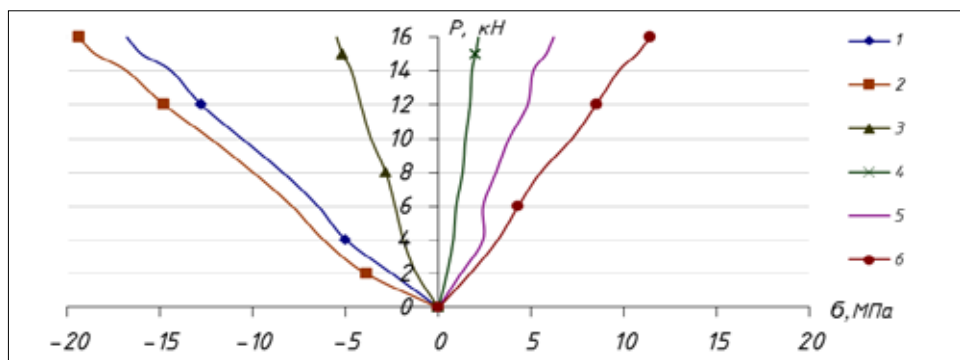


Рис. 5. Напруження в точках розташування тензодатчиків зразка БКА-Н1



а

б

Рис. 6.

а –Руйнування другої серії зразків; б – Прогин балки після руйнування

Проаналізуємо характер роботи зразків третьої серії при статичних навантаженнях та їх можливий процес руйнування. В результаті вимірювань тензорезисторами, наклеєними на деревині по гео-

метричній осі елементів конструкції, отримані графіки залежності деформацій (рис. 7) та напружень (рис. 8) від навантаження. Отримані графіки залежності деформацій (рис. 9) та напружень (рис. 10).

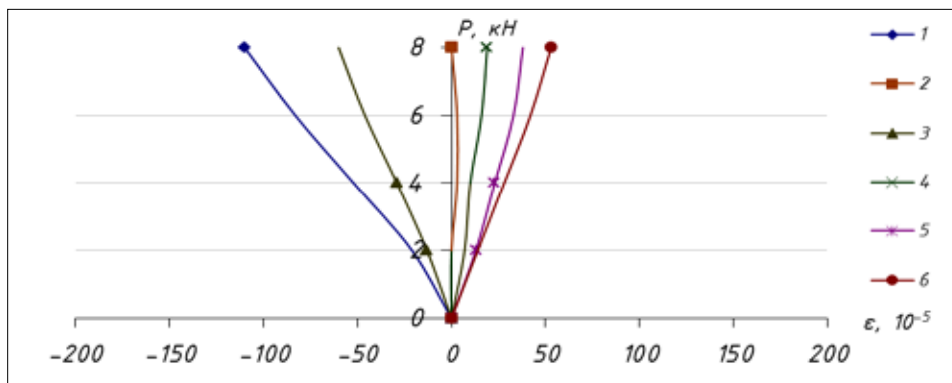


Рис. 7. Відносні деформації зразка БКА-Н2

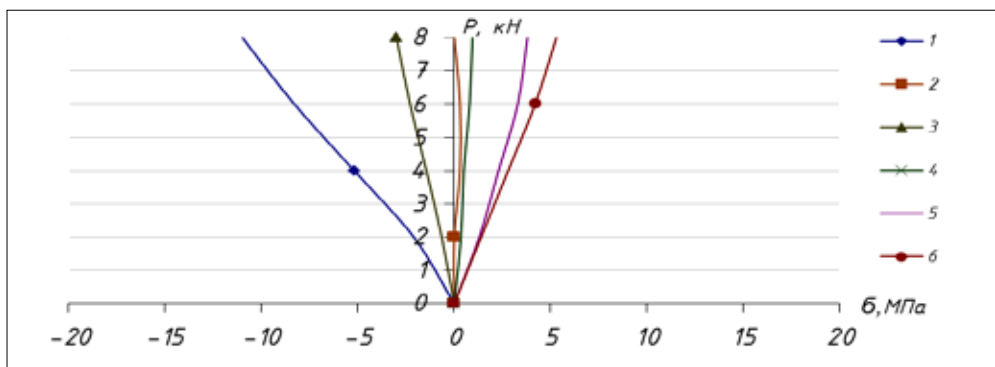


Рис. 8. Напруження в точках розташування тензодатчиків зразка БКА-Н2

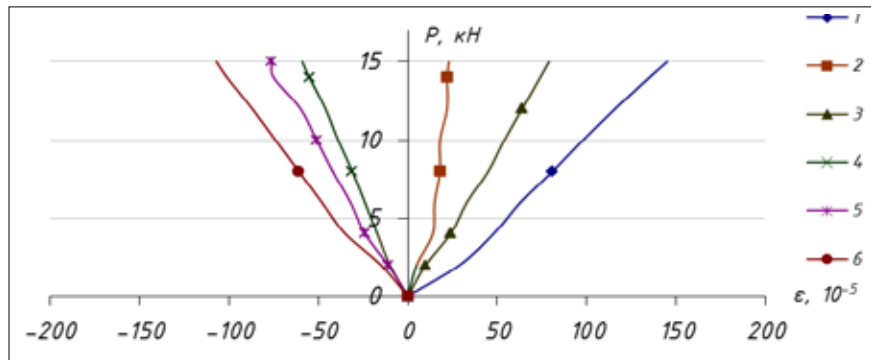


Рис. 9. Відносні деформації зразка БКА-В2

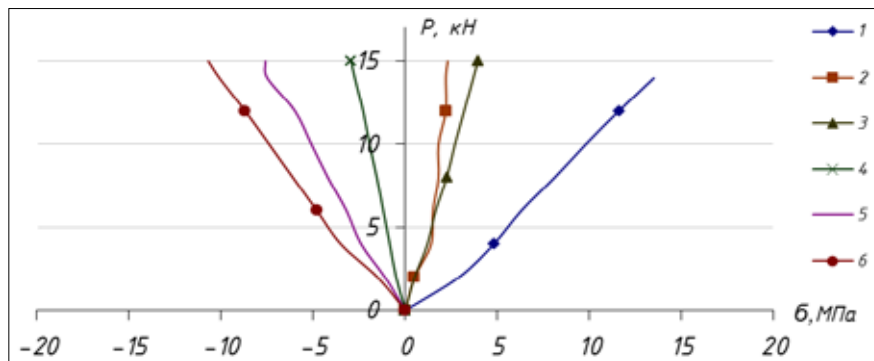


Рис. 10. Напруження в точках розташування тензодатчиків зразка БКА-В2



а



б

Рис. 11.

а – Руйнування третьої серії зразків; б – Прогин балки після руйнування

До зразка третьої серії БКА-НВ1 навантаження прикладалося до втрати несучої здатності зразка, яка відбулась в результаті зміщення стінки по клейовому шву, це показує, що мала площа з'єднання клейовим швом стінки з ОСВ та полицки (рис. 11). Руйнуюче навантаження склало 15,5 кН.

В результаті вимірювань тензорезисторами, наклеєними на деревині по геометричній осі елементів конструкції, отримані графіки залежності деформацій (рис. 12) та напружень (рис. 13) від навантаження.

Визначимо характер роботи зразків четвертої серії при статичних навантаженнях та їх руйнування. Втрата несучої здатності зразка відбулась в результаті руйнування стінки з ОСВ внаслідок дії дотичних напружень на стиск (рис. 14). Похила тріщина утворилась на опорі під кутом нахилу 45°. Крім руйнування стінки відбувся нахил відносно осі. Руйнування має крихкий характер. Руйнуюче навантаження склало 20,5 кН.

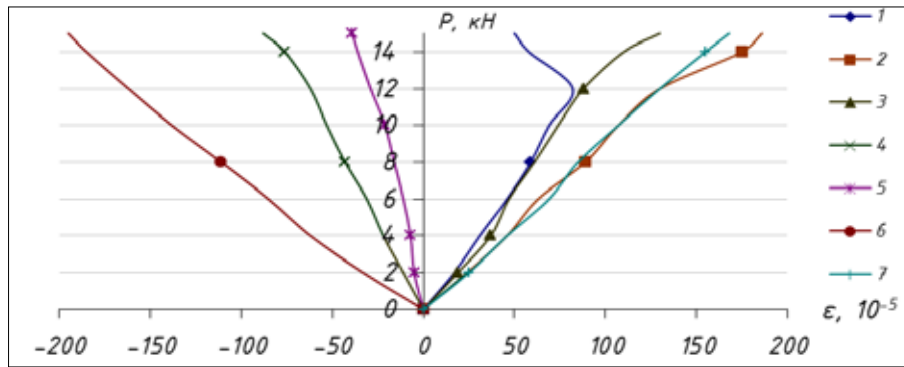


Рис. 12. Відносні деформації зразка БКА-НВ1

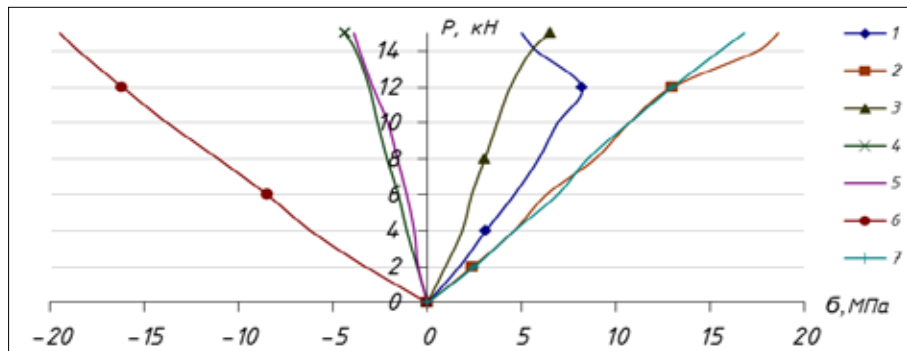


Рис. 13. Напруження в точках розташування тензодатчиків зразка БКА-НВ1



а

б

Рис. 14.

а – Руйнування четвертої серії зразків; б – Прогин балки після руйнування

На основі отриманих результатів побудовані графіки (рис. 15–16).

Після проведеного аналізу визначимо характер роботи зразків п'ятої серії при статичних навантаженнях та їх руйнування. Згідно з прийнятою методикою проведення експериментальних досліджень несучої здатності й деформативності клеєних балок, вимірювання деформацій проводились при обпиранні зразка на дві опори при завантаженні у одній точці на відстані 700 мм від опор.

Втрата несучої здатності зразка БКА-В2Н2-2 відбулась в результаті руйнування стінки з OSB внаслідок дії дотичних напружень (рис. 17,а). Похила тріщина утворилась посередині прольоту та відбувся зріз стінки, також на опорі під кутом нахилу  $45^\circ$  та відбулося руйнування на опорі у вигляді тріщини і відшарування стружок орієнтовно-стружкової плити. Руйнування має крихкий характер. Руйнуюче навантаження склало 12 кН. Прогини представлені на рис.17,б.

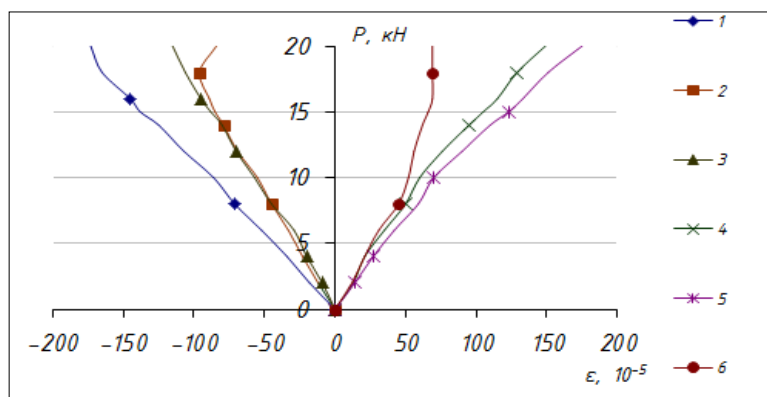


Рис. 15. Відносні деформації зразка БКА-В2Н2

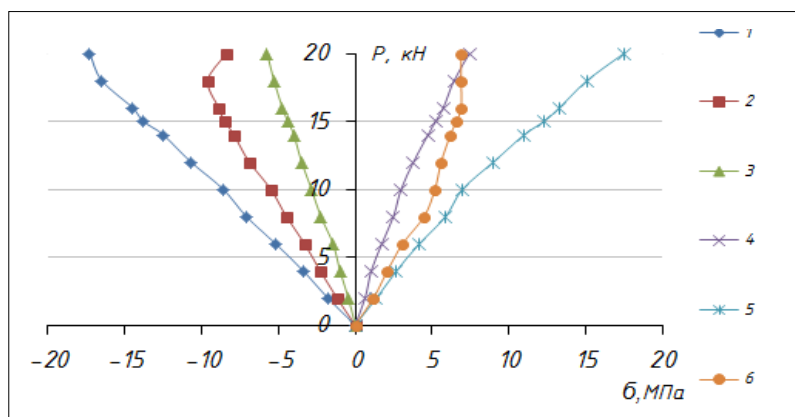


Рис. 16. Напруження в точках розташування тензодатчиків зразка БКА-В2Н2



Рис. 17.

а – Руйнування балки БКА-В2Н2-2 п'ятої серії зразків; б – Прогин балки після руйнування

У ході експерименту вдалося встановити характер руйнування конструкцій та дослідити їх роботу. Випробування показали, що виготовлення конструкцій двотаврових балок зі стінкою з OSB плити та армуванням є доцільним і симетричне армування показало менші прогини, ніж несиметричне одиночне та подвійне (рис. 18).

Порівнявши прогини чотирьох серій балок, можна сказати, що армування склопластиковою арматурою двотаврових дерев'яних балок із стінкою із OSB зменшує прогини і чим більше стержнів тим менші прогини, але і менша міцність клейових швів.

Прогини балок всіх серій зразків збільшувались рівномірно відповідно до росту навантаження



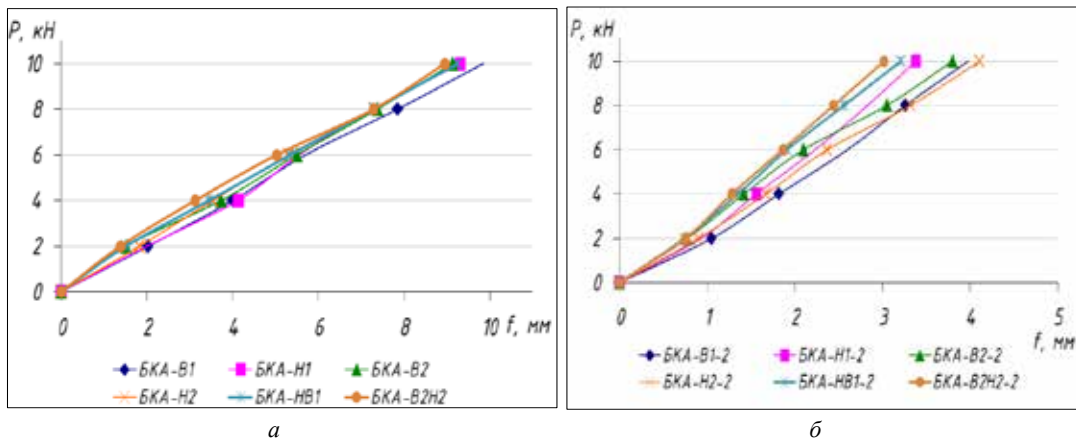


Рис. 18.

а – Залежності прогинів від армування для зразків чотирьох серій; б – Залежності прогинів від армування для зразків п'ятої серії

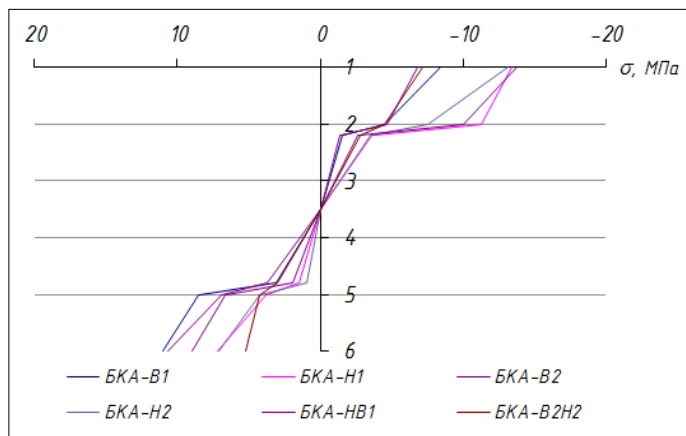


Рис. 19. Епюра напружень для чотирьох серій балок в залежності розташування тензодатчиків

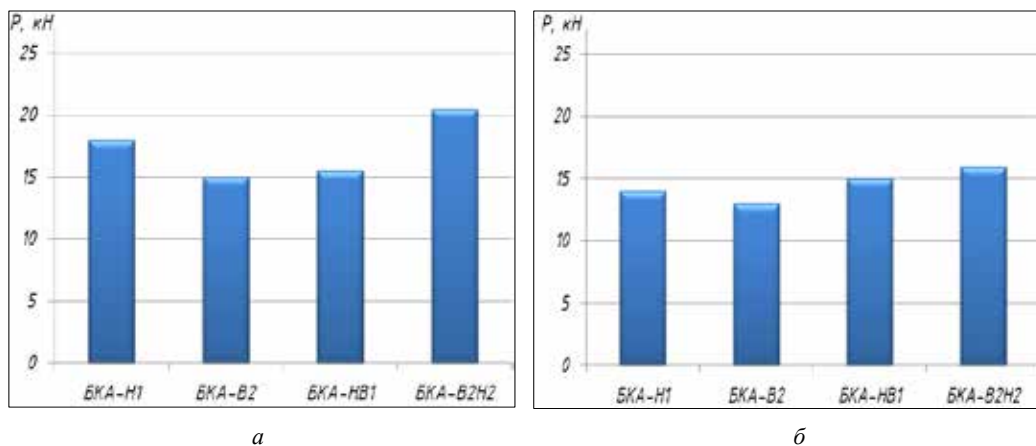


Рис. 20.

а – Графік руйнівного навантаження балок чотирьох серій; б – Графік руйнівного навантаження для балок п'ятої серії

аж до руйнування. По графіках видно, що у балках, які армовані склопластиковою арматурою симетрично мають менші прогини порівняно із балками армованими лише одним та двома стержнями арматури.

По графіках видно, що у балках в яких армування лише у одному із поясів напруження у поясі де знаходиться арматура менші, ніж у іншому поясі і тому симетричне армування балок зменшує напруження у двох поясах. Графіки

руйнівного навантаження для всіх серій зразків приведені на рис. 20.

#### Висновок.

У ході проведеного дослідження випробування показали задовільну роботу дерев'яних армованих склопластиковою арматурою балок двотаврового перерізу зі стінками з орієнтовано-стружкової плити. В результаті випробувань видно, що арму-

вання балок впливає на напруження і прогини. Руйнування всіх зразків відбувалося від дотичних напружень, але деякі зразки зруйнувалися від зсуву стінки відносно полочки і це означає, що недостатня площа клейового шва. Симетричне армування показало кращі результати від одиночного і подвійного та балка зразка четвертої серії БКА-В2Н2 витримала найбільше навантаження, яке склало 20 кН.

#### Список літератури:

1. Dmytrenko, A. Dmytrenko, T., Derkach T., Klochko L.: Experimental Investigation and Computer-Generated Simulation of Reinforced Double-Tee Girders with a Wall of Oriented Standard Board. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.8), pp. 115–119. Elsevier, UK. (2018). <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27224>
2. Sorin, E. Coureau, J., Chaplain, M.: Prediction of the ultimate load-carrying capacity of wooden notched beams with and without reinforcements using a splitting model. *Construction and Building Materials*, vol. 271. Elsevier, UK (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121518>
3. Yua, P., Yangab, Q., Lawa, S.: Lateral performances of traditional wooden frame with loose penetrated mortise-tenon connection and column foot models. *Journal of Building Engineering*, vol. 47. Elsevier, UK (2022). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103793>
4. Du, Y., Doudak, G., Mohareb, M.: Effect of beam-deck connection flexibility on lateral torsional buckling strength of wooden twin-beams. *Engineering Structures*, vol. 207. Elsevier, UK (2020). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110226>

#### Chichulina K.V. ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH RESULTS OF REINFORCED WOODEN I-BEAMS

*The purpose of the experimental studies presented in the article is to study the work, determine the load-bearing capacity and the nature of the destruction of composite reinforced fiberglass reinforcement wooden beams with a wall of OSB with solid belts and their comparison. The object of the study is glued fiberglass-reinforced wooden balls of I-beam section with a wall with OSB and integral belts of floors and roofs of buildings and structures. To achieve this goal, six composite glued fiberglass-reinforced wooden beams of I-beam section with an OSB wall and integral belts were made. The first two beams are made with single reinforcement from above and below, the second and third beams with double reinforcement from above and below, the fifth with symmetrical single reinforcement and the sixth with symmetrical double reinforcement, to study their operation under static loads. Six beams with the same but smaller dimensions were also fabricated to compare deflections from single force loading. According to the accepted method of conducting experimental studies of bearing capacity and deformability of glued beams, deformation measurements were performed when the sample was supported on two supports when loading at two points at a distance of 900 mm from the supports. The destruction of I-beams of this type occurs as a result of rupture of the wall from the action of tangential stresses, the destruction of the shelf in the stretched area and the displacement of the wall along the adhesive seam. Given the fact that the destruction of the shelf in the stretched area began with the knot of the beam, it is necessary to ensure the absence of such defects in the area of maximum bending moment in the production of glued wooden beams. In the manufacture of structures, special attention should be paid to the quality of the adhesive connection of the wall with the belts of the beam and in symmetrical reinforcement, it is recommended to increase the depth of the grooves to increase the area of the adhesive seam. This will ensure reliable bonding and deformation of the shear between the walls and shelves will be absent.*

**Key words:** wooden beams, OSB, experiment, destruction, strength, load.

**Shyshkina O.O.**

Kryvyi Rih National University

## APPLICATION OF GYPSUM IN MICELLAR CATALYSIS OF PORTLAND CEMENT HYDRATION REACTIONS

*To obtain modern high-quality concrete, a sufficient number of special additives are used. The most common additives are surfactants. The use of surfactants leads to a decrease in the ratio of water to cement, which, in turn, leads to an increase in the strength of concrete. At the same time, the degree of hydration of cement decreases, which reduces the durability of concrete. In addition, as a result of the interaction reactions between cement minerals and the surfactant, substances are formed that are not inherent in the cement cameo, which hardens without additives. It is established that the active components of modern concrete are micelles filled with active mineral fillers, such as gypsum, as well as superplasticizers. The optimal combination of these additives-modifiers allows you to control the rheological properties of concrete mixtures and modify the structure of cement stone so as to ensure the properties of concrete, ensuring high operational reliability of structures. However, they have certain shortcomings that prevent their widespread use. The aim of the study is to determine the effect of gypsum, which is used as a reaction powder filled with micelles of colloidal surfactants, on the strength of powdered concrete and catalysis of hydration reactions of Portland cement components. Studies and their results have shown that the use of micelles of colloidal surfactants filled with gypsum leads to increased efficiency of both components. This enhances the catalytic effect of the hydration reactions of the components of Portland cement and gypsum itself. Increasing the rate of hydration of Portland cement components provides increased productivity of concrete and reinforced concrete structures. Analysis of the results of the research showed the presence in the system under study of the optimal content of reactive powder capable of entering into a hydration reaction.*

**Key words:** cement, gypsum, micelles, strength, surfactants, plasticizers.

### Formulation of the problem

In recent years, interest in multicomponent reactions (MCR) has sharply increased. New MCRs and variants of already known reactions provide access to a huge variety of structures, including those of natural origin, capable of exhibiting a wide range of chemical activity, and the range of available compounds is constantly increasing.

Intensive construction methods require the introduction of modern technologies that would ensure the manufacture of structures in a short time, increase the turnover of molding equipment, and shorten the production cycle. For high-speed technologies, it is mandatory to use quick-setting binders to obtain high-strength concrete in one or two days. Therefore, there is a need to develop high-performance fast-hardening building composites that ensure the commissioning of facilities in a short time and their reliable operation throughout the entire life cycle. Repair, restoration and reconstruction of existing construction sites, the restoration of operational functions of which is possible only for certain short periods of time (underpasses, sidewalks, buildings at airports and railways, hydraulic structures), requires the use of effective fast-hardening materials. The

hardening process of Portland cement, which is the basis for the production of most building structures, is based on hydration reactions, which are referred to as MCR. At present, the application of various types of catalysis to almost all reactions used in chemistry, including MCR, has become a stable trend. Even those transformations that were previously carried out without the use of any catalysts are now involved in the range of catalytic processes, which reflects the general general trend towards increasing the efficiency of chemical synthesis.

### Analysis of recent research and publications

The multicomponent synthesis of chemical compounds became a separate area of research. The authors of these works note a higher efficiency of multicomponent transformations, as compared to multistage syntheses, and the possibility of automating syntheses based on them. In addition, new MCRs and variants of already well-known reactions open up access to a huge variety of structures, including those of natural origin, which can exhibit a wide range of chemical activity, and the range of available compounds is constantly increasing. It should be noted that the use of catalytic methods to increase the efficiency of MCR has a special specificity. Such

transformations are complex systems consisting of a network of subreactions; therefore, traditional methods for accelerating chemical processes (using high temperatures, acids or bases) often do not give the desired result. They usually act non-selectively, accelerating side two-component reactions, leading to the appearance of undesirable products in the system. Methods that increase the efficiency of chemical synthesis include the use of nanomodified water [1–5], micellar solutions [6–8], and inorganic compounds (clays, zeolites, silica gel, metal oxides, carbon nanotubes, and nanofibers) [5; 9–16]. The use of these methods made it possible to significantly expand the scope of old, well-known reactions and discover a number of new ones. In recent years, this approach has found application in the field of MCR. The effect of the use of all known inorganic compounds used as nanocatalysts for hydration reactions of Portland cement components is significantly increased with the additional introduction of surfactants of organic origin. In this case, micelles of surfactants are artificially created, which are filled with inorganic compounds. At the same time, it is known that in water all its molecules are interconnected by hydrogen bonds, but at the points of contact with the organic phase, a layer of water molecules with free OH groups is formed, which can catalyze a wide range of reactions. The phenomenon of changing

the properties of water upon the introduction of surfactant micelles into it was noted only in a small number of studies [1]. At the same time, it should be noted that all inorganic compounds currently used to catalyze hydration reactions are inactive or inactive with respect to water. Guidance on the development of the “sol-gel” technology to be filled with inorganic speech micelles for adjusting the density of concrete [5; 9–17].

**Setting objectives**

The purpose of the research is to determine, using the example of gypsum, the effect of an inorganic substance, as a reactive powder, which is used simultaneously with a colloidal surfactant, on the strength of fine-grained concrete and the rate of its formation. In accordance with the goal, the objectives of the study are to determine the dependence of the strength of concrete on the amount of gypsum, both in the presence of a colloidal surfactant and without it; to determine the effect of a colloidal surfactant on the effectiveness of gypsum as a component of a filled micelle – a catalyst for hydration reactions of Portland cement components, while monitoring the increase in concrete strength.

**Presentation of the main material of the study**

For the production of concrete, Portland cement grade M400 was used by “Kryvyi Rih Cement” OJSC (Ukraine). Building gypsum ground to a specific

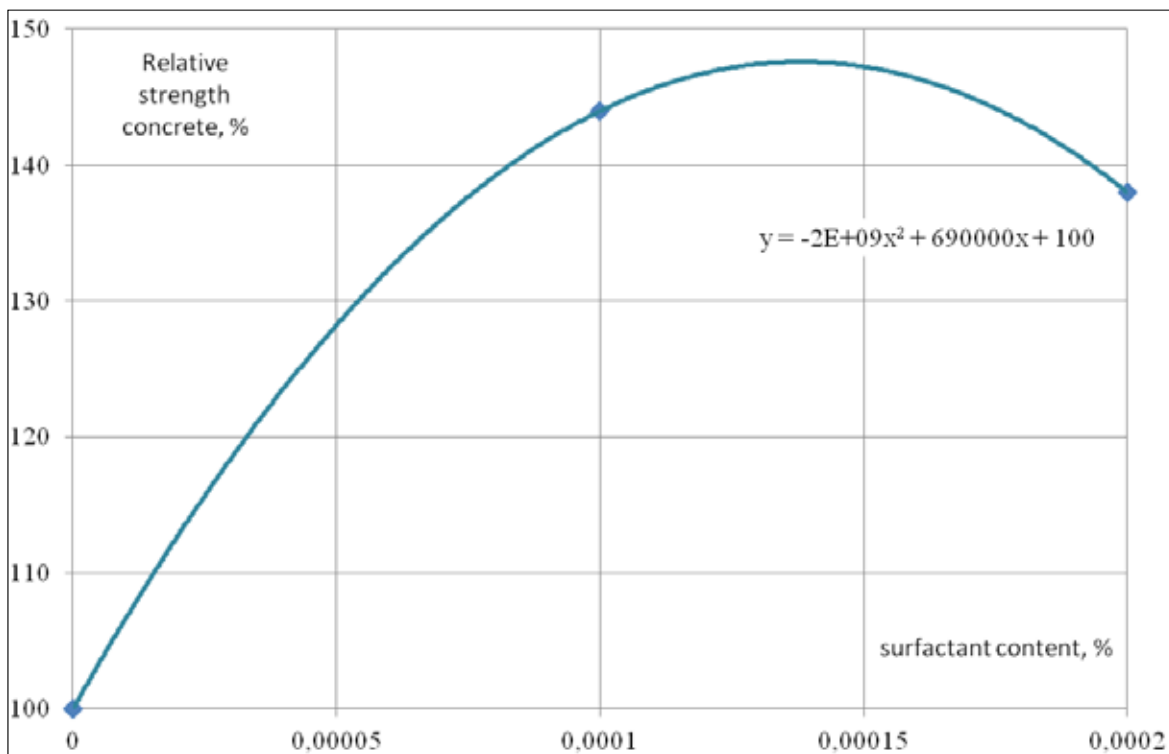


Fig. 1. Influence of surfactants on the strength of gypsum stone at the age of 7 days

surface area of 300 m<sup>2</sup>/kg was used as the reaction powder. Sodium oleate (Simagchem Corp., China) was used as a micellar surfactant (MPAR).

The components of the concrete mixture were dosed in the quantities required, according to the experimental design, in quantities, mixed with a laboratory mixer for 2 minutes. The resulting mixture was contained with a vibration seal in a metallic form having a side size of 16 × 4 × 4 cm. Formed in this way, concrete samples were hardened for 28 days at an ambient humidity of 70 ± 10% and an ambient temperature of 293 ± 2 K.

The compressive strength of the stone obtained as a result of hydration of the dispersed system “gypsum – hydrophobic surfactant – water” (Fig. 1).

The compressive strength of the stone obtained as a result of hydration of the dispersed system “Portland cement – hydrophobic surfactant – reactive powder” when used as a reactive gypsum powder is higher than the strength of concrete obtained on the basis of Portland cement without additives (Fig. 2). The same phenomenon is also observed at the age of 28 days (Fig. 3).

When the system under consideration contains gypsum in the amount of 5% and a surfactant in the amount of 0.02%, a sharp increase in the rate of hydration reactions occurs, which ensures an increase in the rate of formation of concrete strength (Fig. 4).

Thus, concrete containing micelles filled with 5% gypsum at the age of 2 days has the strength of concrete without additives at the age of 7 days. At the same time, the strength of concrete obtained as a result of catalysis of hydration reactions at the age of 28 days is 120% of the strength of concrete without additives.

When the system under consideration contains gypsum in the amount of 10% and a surfactant in the amount of 0.02%, a sharp increase in the rate of hydration reactions occurs, which ensures an increase in the rate of formation of concrete strength (Fig. 5). So, concrete containing micelles filled with gypsum in an amount of 10% with a surfactant content in an amount of 0.01%, at the age of 2 days, has the strength of concrete without additives at the age of 7 days. At the same time, the strength of concrete obtained as a result of catalysis of hydration reactions at the age of 28 days is 138% of the strength of concrete without additives.

Thus, the presence of a complex surfactant in the dispersed system provides increased compressive strength of the resulting concrete.

The rate of strength gain in compression of concrete obtained as a result of hydration reactions in the dispersed system “Portland cement – surfactant – reaction powder” depends on the amount of reaction powder (gypsum under experimental conditions) and surfactant used.

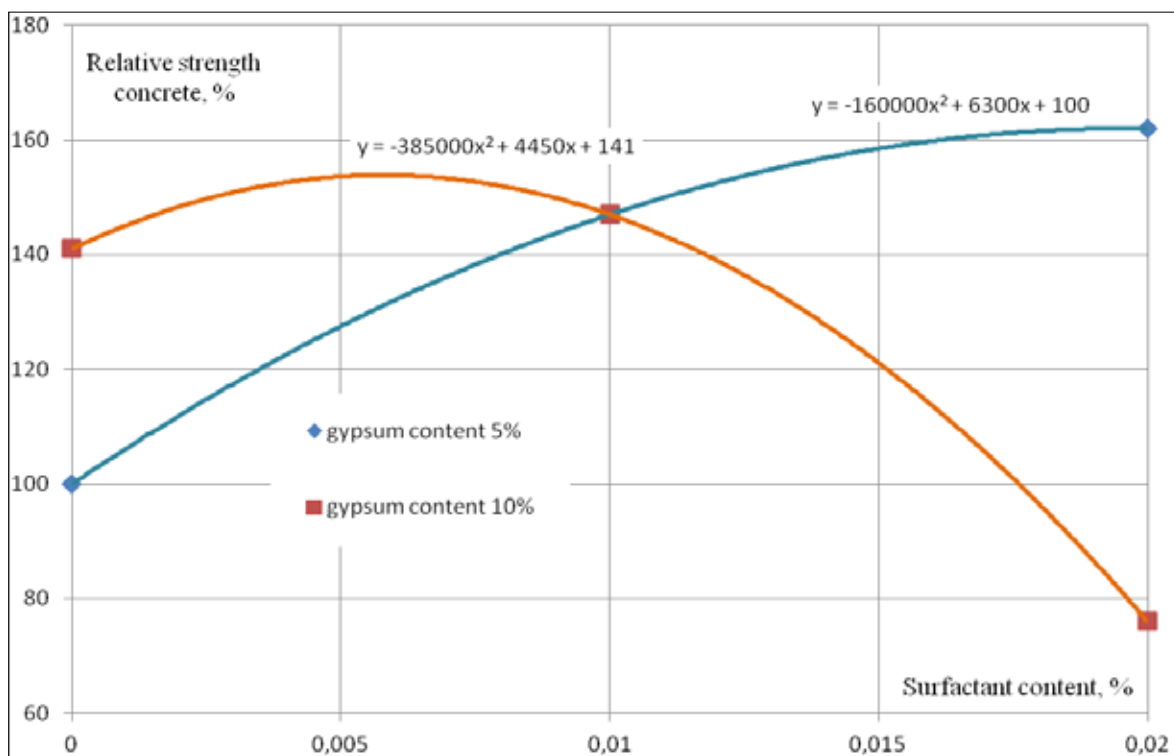


Fig. 2. Relative strength of concrete at the age of 7 days

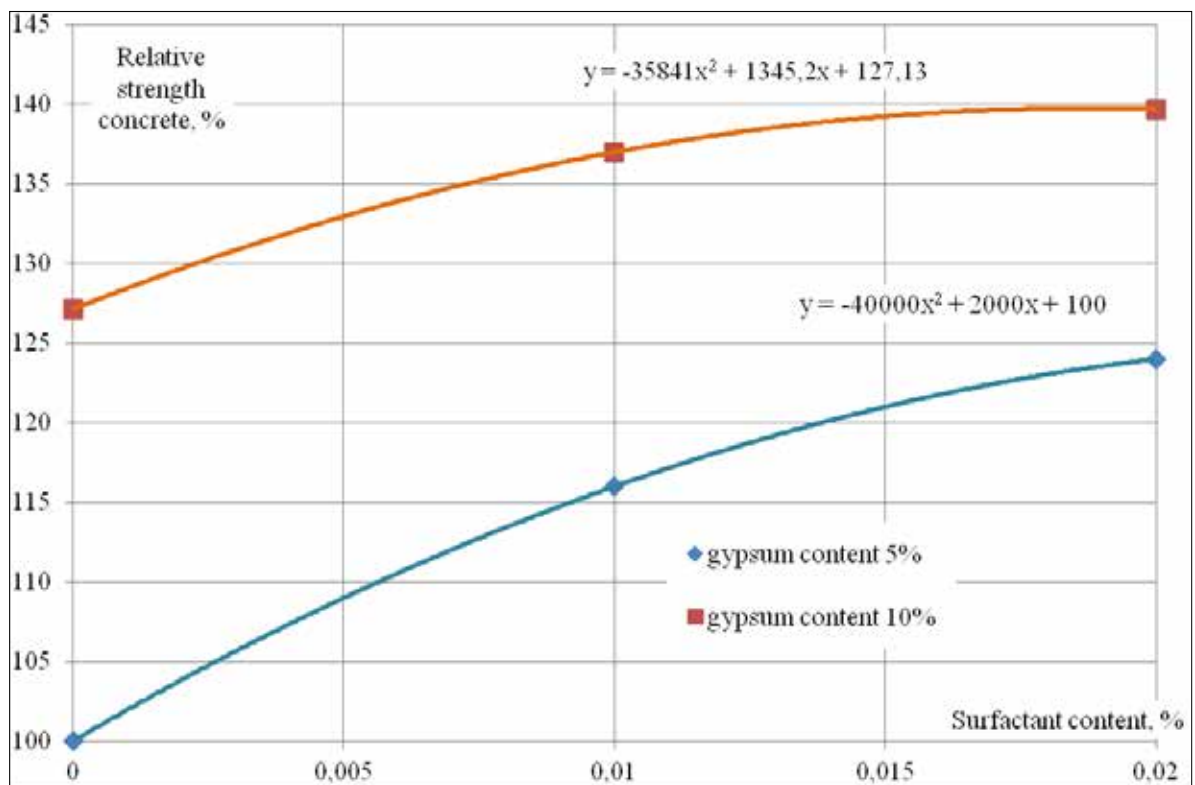


Fig. 3. Relative strength of concrete at the age of 28 days

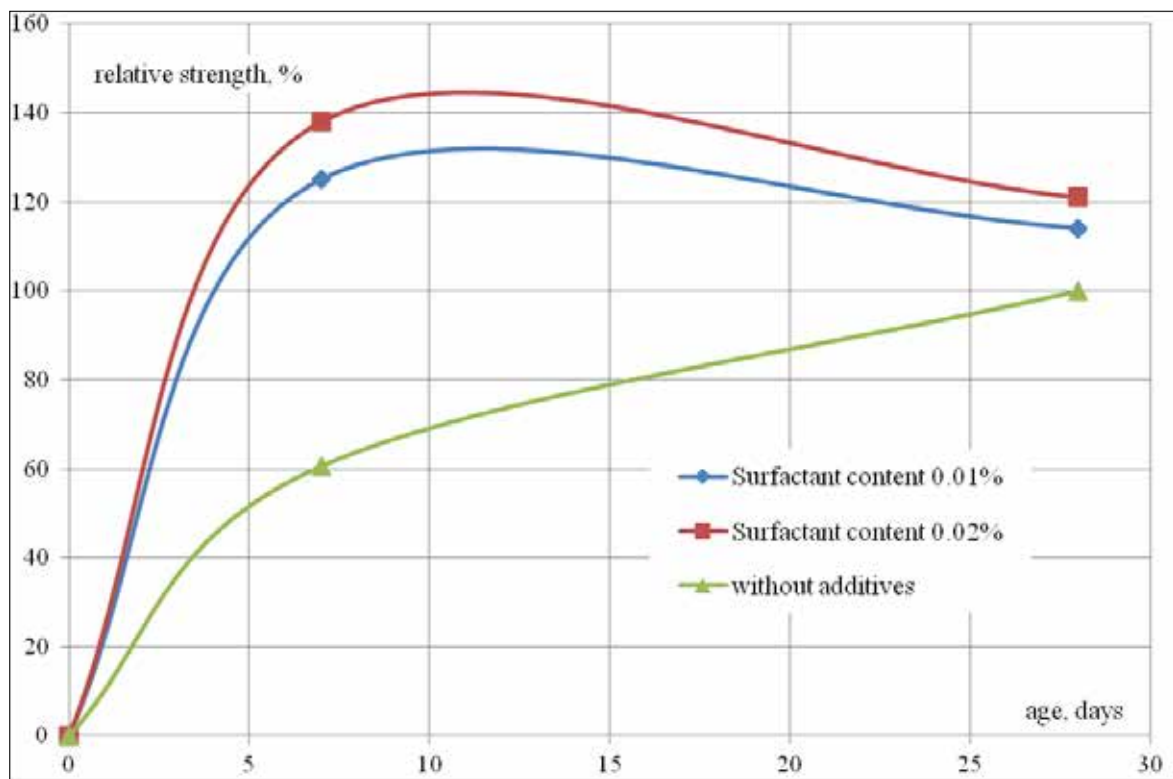


Fig. 4 Change in concrete strength over time (5 % gypsum)

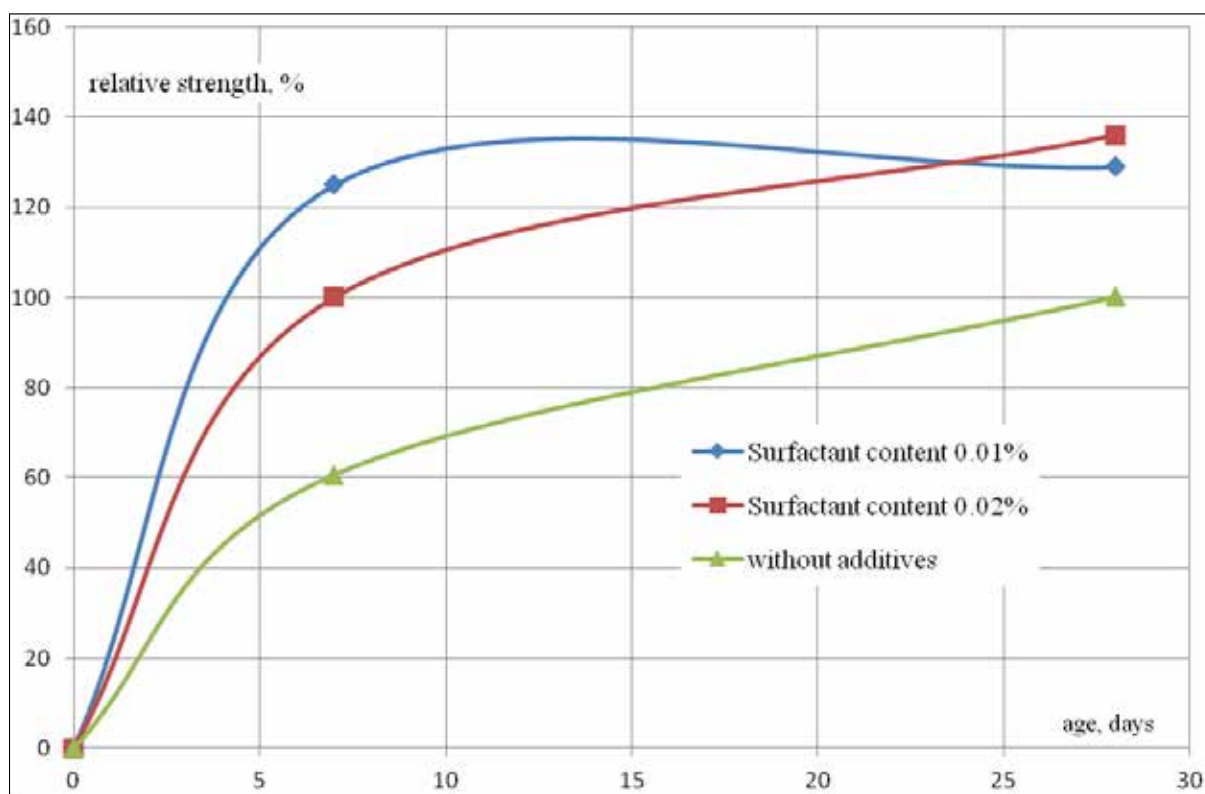


Fig. 5 Change in concrete strength over time (10 % gypsum)

Under the experimental conditions, the highest rate of curing of concrete is provided by the content of gypsum in the amount of 5% and surfactant in the amount of 0.02%. Concretes containing gypsum in the amount of 10% and surfactant in the amount of 0.02% have the maximum increase in the strength of concrete.

Thus, surfactant micelles filled with gypsum provide an increase in the rate of hydration reactions of Portland cement components, which ensures an increase in the rate of concrete strength formation.

An analysis of the results of the studies performed showed the presence in the system under study of the

optimal content of the reactive powder capable of entering into hydration reactions.

#### Conclusions

The conducted studies and their results showed that the use of micelles of colloidal surfactants filled with gypsum leads to an increase in the efficiency of the use of both components. This increases the effect of catalysis of the hydration reactions of the components of Portland cement and the gypsum itself. An increase in the rate of hydration of the components of Portland cement provides an increase in the productivity of the production of concrete and reinforced concrete structures.

#### References:

1. A. Shyshkina, A. Shyshkin. Follow-up of the injection of nanocatalyst on the molding of the minerality of reaction powder concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016.1/6(79). 55–60.
2. A. Shyshkina, A. Shyshkin. Fine-Grained Concrete for Repair and Restoration of Building Structures *Materials Science Forum Submitted: 2021*. Vol. 1038, pp 317–322. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
3. R. N. Butler, A. G. Coyne, *Chem. Rev.*, 2010. 110. 6302
4. A. Shyshkina, A. Shyshkin, Application of the easy concentration effect in concrete technology. 2020 IOP Conf. Ser.: *Mater. Sci. Eng.*, 2020. 907(1). 012038.
5. A. Shyshkina, A. Shyshkin, Application of Colloid Surface-Active Substances as a Nanocatalyst of Reactions Cement Hydration. *European Journal of Applied Sciences*, 2021.9(5). 83–99.
6. C.-J. Li, T.-H. Chan, *Comprehensive Organic Reactions in Aqueous Media*, 2nd ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2007.
7. A. Shyshkina, A. Shyshkin. Study of the effect of micellar catalysis on the strength of alkaline reactive powder concrete. *EEJET*. 2018.3/6(93). 46–51.

8. IV Berezin, K.Martinek, AK Yatsimirsky Physical and chemical bases of micellar catalysis. *Advances in Chemistry*. 1973.10. 1729–1756.
9. A.A. Shyshkina, A.A. Shyshkin. Influence of modified kaolin on the strength of powdered concrete. *Scientific bulletin of everyday life*. 2018. 1(91). 169–172.
10. V. N. Derevyanko, A. G. Chumak, V. A. Tel'yanov N. V. Kondratieva Nanomodification of the structure of gypsum binders. *Bulletin of PGASA*, 2012. 6. 31–36.
11. E. V. Korolev. Nanotechnologies in building materials science. Analysis of the state and achievements. Ways of development. *Construction Materials*. 2014. 11. 47–78.
12. H. R.Ashani, S. P. Parikh, J. H. Markna Role of Nanotechnology in Concrete a Cement Based Material: A Critical Review on Mechanical Properties and Environmental Impact. *International Journal of Nanoscience and Nanoengineering*. 2015. 2(5). 32–35.
13. B.-W.Jo, C.-H.Kim, G.Tae, J.-B.Park Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles. *Construction and Building Materials*. 2007.Vol. 21, Issue 6. 1351–1355.
14. M.S. Morsy, S. H. Alsayed, M. Aqel. Effect of Nano-clay on Mechanical Properties and Microstructure of Ordinary Portland Cement Mortar. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*. 2009. Vol. 10. 1. 23–27.
15. S. Shah et al. News on Nanotechnology. *Public Roads*. 2008. Vol. 71. 6. 42–48.
16. S.N. Tolmachev, E.A. Belichenko Prospects for the use of nanoparticles in transport concrete. *Budivelni materiali and virobi*. 2017. 1–2. 38–41.

### **Шишкіна О.О. ЗАСТОСУВАННЯ ГПСУ У МІЦЕЛЯРНОМ КАТАЛІЗІ РЕАКЦІЙ ГІДРАТАЦІЇ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ**

Для отримання сучасних бетонів високої якості застосовують достатню кількість спеціальних добавок. Найбільш розповсюдженими добавками є поверхнево-активні речовини. Застосування поверхнево-активних речовин призводить до зменшенні відношення води до цементу, що, в свою чергу, призводить до збільшення міцності бетону. В той же час зменшується ступінь гідратації цементу, що призводить до зменшення довговічності бетону. Крім того в наслідок реакцій взаємодії між мінералами цементу та поверхнево-активною речовиною утворюються речовини, які не притаманні цементному каменю, який твердів без добавок.

Встановлено, що активними компонентами сучасних бетонів є міцели, наповнені активними мінеральними наповнювачами, такими як гіпс, а також суперпластифікаторами. Оптимальне поєднання цих добавок-модифікаторів дозволяє контролювати реологічні властивості бетонних сумішей і модифікувати структуру цементного каменю таким чином, щоб забезпечити властивості бетону, що забезпечують високу експлуатаційну надійність конструкцій. Однак вони мають певні недоліки, які перешкоджають їх широкому застосуванню. Метою дослідження є визначення впливу гіпсу, який використовується як реакційний порошок, наповнений міцелами колоїдних поверхнево-активних речовин, на міцність порошкоподібного бетону та каталіз гідратаційних реакцій компонентів портландцементу.

Проведені дослідження та їх результати показали, що використання міцел колоїдних поверхнево-активних речовин, наповнених гіпсом, призводить до підвищення ефективності використання обох компонентів. Це посилює ефект каталізу реакцій гідратації компонентів портландцементу і самого гіпсу. Збільшення швидкості гідратації компонентів портландцементу забезпечує підвищення продуктивності виробництва бетону та залізобетонних конструкцій. Аналіз результатів проведених досліджень показав наявність у досліджуваній системі оптимального вмісту реакційно-здатного порошку, здатного вступати в реакції гідратації.

**Ключові слова:** цемент, гіпс, міцели, міцність, поверхнево-активні речовини, пластифікатори.



# ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/50>**Ліневич Я.О.**

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

**Коваль В.М.**

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

**Душейко М.Г.**

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

**Лакида М.О.**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

## СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КРЕМНІЄВИХ 1D НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В СЕНСОРАХ ОСВІТЛЕННОСТІ

*Стаття присвячена виготовленню та дослідженню сенсорів освітленості на основі кремнієвих 1D нанорозмірних структур. Кремнієві нанонитки були синтезовані методом метало-стимульованого хімічного травлення (МАСЕ). На основі кремнієвих 1D нанорозмірних структур були виготовлені сенсори освітленості резистивного, діодного та фотоелектричного виду. Для синтезу сенсорів здійснювали наступні операції: хімічне очищення поверхні кремнієвих пластин; стандартне або модифіковане метало-стимульоване хімічне травлення для синтезу кремнієвих нанониток на поверхні кремнієвих пластин; операцію дифузії для створення р-п-переходу в нанонитках; нанесення фронтальної та тильної металізації. Для отриманих датчиків були розраховані електричні та фоточутливі параметри: темновий питомий опір, коефіцієнт випрямлення, фотовідгук, коефіцієнт фоточутливості. Було встановлено вплив технологічних параметрів синтезу кремнієвих нанониток на робочі характеристики сенсорів освітленості на їх основі. Зокрема показано вплив текстуровання поверхні пластини, тривалості першого та другого етапу МАСЕ, обробки в ізотропному/анізотропному травниках, додавання поверхнево-активної речовини, одно- або двохсторонньої обробки пластини під час МАСЕ та видалення залишків срібних наночастинок. Максимальний фотовідгук сенсора освітленості резистивного типу спостерігався для текстурованої підкладки з обробкою в кислотному травнику (1,33 мА/лмВ). Максимальний фотовідгук сенсора освітленості діодного типу спостерігався для текстурованої підкладки без обробки в травниках та додавання ПАР (36,04), а максимальна фоточутливість становила 4,3 мА/лмВ для нетекстурованої кремнієвої пластини з обробкою в лужному травнику. Для сенсорів фотоелектричного типу максимальний коефіцієнт фоточутливості (144,9 мА/Вт) було одержано для нетекстурованої підкладки з обробкою в лужному травнику.*

**Ключові слова:** 1D нанорозмірні структури, кремнієві нанонитки, метало-стимульоване хімічне травлення, сенсори освітленості, фоточутливість.

**Постановка проблеми.** В останнє десятиліття постійно зростає інтерес до кремнієвих наноструктур для застосування їх в різноманітних електронних приладах: від транзисторів інтегральних мікросхем до сенсорів та сонячних елементів [1, с. 1411; 2, с. 1955; 3, с. 58; 4, с. 1454]. Зокрема кремнієві 1D нанорозмірні структури

є дуже перспективними в сенсоріці, оскільки наноструктури з великою площею бічної поверхні забезпечують сенсору збільшену площу чутливої поверхні, а отже його покращений відгук [5, с. 100671]. Одним із різновидів 1D нанорозмірних структур є нанонитки, що являють собою суцільні дроти шириною до 10 нм і довжиною,

яка набагато перевищує ширину, що забезпечує їм високе аспектне відношення (до 100) [6, с. 393]. На сьогодні кремнієві нанонитки (silicon nanowires – SiNWs) широко застосовуються в різних видах сенсорів: деформації [7, с. 2642], температури [8, с. 12959], парів етанолу [9, с. 61], оксиду азоту [10, с. 1], вологості [11, с. 130184], білку [12, с. 149175], парів ацетону [13, с. 121260], парів нафти [14, с. 797] та формальдегіду [15, с. 63]. Оскільки SiNWs характеризуються розвинутою структурованою поверхнею, то дані види наноструктур значно зменшують коефіцієнт оптичного відбивання від кремнієвої поверхні, що актуально для застосування в сенсорах освітленості [16, с. 282]. Крім того, в бар'єрних структурах на основі SiNWs має місце збільшення оптичного та зменшення електронного шляху, що забезпечує покращений фотоелектричний відгук таких приладів [17, с. 425]. Таким чином, використання кремнієвих 1D нанорозмірних структур в сенсорах освітленості є вкрай перспективним завданням на сьогодні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Кремнієві нанонитки синтезують в рамках двох підходів: зверху-донизу (top-down approach) та знизу-вгору (bottom-up approach). У підході зверху-донизу частини монокристалічної пластини видаляються, в результаті чого утворюються одновимірні стовпчики (нанонитки): метод метало-стимульованого хімічного травлення (Metal Assisted Chemical Etching – MACE) [18, с. 2] та нанодруківана літографія з реактивним іонним травленням (RIE/NIL) [19, с. 178]. У підході знизу-вгору має місце вирощування кремнієвих нанониток з окремих атомів методом вирощування пара-рідина-тверде тіло (Vapor-Liquid-Solid – VLS growth) [20, с. 152]. Порівняння масивів SiNWs, одержаних трьома різними методами (VLS, DRIE/NIL, MACE) показало, що масиви кремнієвих нанониток, одержаних VLS та DRIE/NIL, характеризуються високим ступенем впорядкованості у розташуванні нанониток, однак невисокою їх густиною по поверхні [21, с. 381]. Крім того, в методі DRIE/NIL спостерігається значна шорсткість бічних стінок нанониток. Враховуючи високу вартість та складність технологічного обладнання, досить перспективним на сьогодні є метод MACE. Про це свідчить також значне зростання за останні 10 років кількості публікацій по MACE-SiNWs в наукометричній базі даних ScienceDirect порівняно з кількістю публікацій по VLS-SiNWs [22, с. 13]. Метод метало-стимульованого хімічного травлення дозволяє одержати

масив SiNWs з високим аспектним відношенням, високою щільністю на поверхні і гладкими стінками [23, с. 4063]. Також до переваг даного методу відносять простоту виконання, низьку вартість та сумісність з кремнієвою інтегральною технологією виготовлення. На сьогодні існує багато робіт, що присвячені впливу технологічних параметрів синтезу кремнієвих нанониток методом MACE на їх структурні та оптичні властивості [24, с. 2782]. Однак бракує досліджень щодо встановлення впливу цих параметрів на робочі характеристики сенсорів освітленості на основі SiNWs, чому й присвячена дана робота.

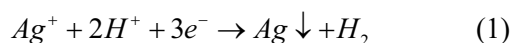
**Постановка завдання.** Метою роботи є синтез та дослідження кремнієвих 1D нанорозмірних структур для застосування в сенсорах освітленості. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: синтезувати кремнієві нанонитки методом метало-стимульованого хімічного травлення; виготовити на їх основі сенсори освітленості резистивного, діодного та фотоелектричного виду; дослідити електричні та фоточутливі характеристики сенсорів освітленості на основі кремнієвих нанониток; встановити вплив технологічних параметрів синтезу кремнієвих нанониток на робочі характеристики сенсорів освітленості на їх основі.

**Синтез сенсорів освітленості на основі кремнієвих нанониток.** Процес синтезу сенсорів освітленості складався з наступних етапів: хімічне очищення поверхні кремнієвих пластин; стандартне або модифіковане метало-стимульоване хімічне травлення для синтезу кремнієвих нанониток на поверхні кремнієвих пластин; операція дифузії для створення р-n-переходу в нанонитках; нанесення фронтальної та тильної металізації.

Для синтезу кремнієвих нанониток використовувались кремнієві підкладки КДБ-1, які підлягали трьохстадійному процесу очищення. На першому етапі механічні та органічні забруднення видаляють в перекисно-аміачному розчині  $NH_4OH/H_2O_2/H_2O$  (1:1:3) за температури 80 °C протягом 10 хв. На другому етапі залишкові іони металів видаляють в перекисно-хлорному розчині  $HCl/H_2O_2/H_2O$  (1:1:3) за температури 80 °C протягом 10 хв. На третьому етапі пластину занурюють у розчин плавикової кислоти  $H_2O/HF$  (100:0,5) на 30 с для видалення поверхневого оксиду кремнію. Після кожної операції пластини промивалися в трьохкаскадній ванні з деіонізованою водою (60 °C/40 °C/20 °C) впродовж 20 хв, після чого просувалися на центрифугі.

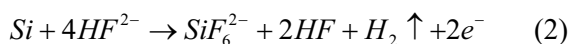
В даній роботі для синтезу кремнієвих нанониток використовувався двохладійний метод метало-стимульованого хімічного травлення. Технологічні параметри синтезу зразків наведені в табл. 1.

Стандартна методика проведення операції МАСЕ включає в себе дві стадії: осадження наночастинок срібла на поверхні кремнієвої пластини та травлення кремнію під цими наночастинами. Хімічна реакція, яка описує першу стадію МАСЕ, наведена нижче:



Приготування розчину для першої стадії МАСЕ відбувалося на основі нанопорошку нітрату срібла: 68 мг  $AgNO_3$  розчинили в 4,42 мл 40% розчину та  $HF$  10 мл  $H_2O$ . Потім до суміші додають  $H_2O$ , щоб отримати 20 мл розчину. Тривалість першої стадії МАСЕ становила від 20 до 60 с.

Хімічна реакція, яка описує другу стадію МАСЕ, наведена нижче:



Приготування розчину для другої стадії МАСЕ відбувалося на основі перекису водню: 11 мл 40%  $HF$ , 30 мл  $H_2O$  та 0,8 або 0,4 мл. Тривалість другої стадії МАСЕ становила від 30 до 90 хв.

Для видозміни структурних параметрів кремнієвих нанониток були використані також додаткові технологічні операції до, під час та після стандартної операції МАСЕ: текстурування кремнієвої пластини, обробка в ізотропному/анізотропному травниках, додавання поверхнево-

активної речовини (ПАР), одно- або двохстороння обробка пластини під час операції МАСЕ, видалення залишків срібних наночастинок.

Операція текстурування кремнієвої пластини було здійснено перед процесом МАСЕ на окремій групі зразків з метою одержання більш розвиненої fotocутливої поверхні за рахунок наявності пірамідок текстури. Зразки текстурували в розчині: 970 мл  $H_2O$ , 30 г  $KOH$ , 70 мл  $IPA$ , протягом 15 хв за температури  $75^\circ C$ .

Обробку в ізотропному/анізотропному травниках було здійснено перед процесом МАСЕ з метою видалення пористих (порушених) шарів для забезпечення рівномірного наступного травлення в процесі МАСЕ. Для експерименту використовувались два види травника: кислотний травник  $HF/HNO_3/CH_3COOH$  (1:4:4), який забезпечує ізотропне травлення поверхні, та лужний травник  $NaOH/IPA/H_2O$  (2:10:88), в якому відбувається анізотропне травлення. Також в роботі було проведено експеримент з додавання до розчину другої стадії МАСЕ поверхнево-активної речовини (ПАР). Відомо, що ПАР не беруть участі у процесі травлення, але впливають на швидкість травлення та шорсткість поверхні. Для цього в роботі використовувалось 10 мл ізопропилового спирту ( $IPA$ ) (табл. 1). Під час травлення МАСЕ з хімічного розчину виділяються бульбашки  $H_2$ , які значно перешкоджають рівномірному травленню по поверхні. Завдяки додаванню  $IPA$  в розчині утворюються менше бульбашок, що обумовлено зменшенням сили поверхневого натягу розчину.

Зазвичай під час процесу МАСЕ відбувається травлення обох сторін кремнієвої пластини

Таблиця 1

Технологічні параметри синтезу зразків

№ зразку	Параметри стандартного процесу МАСЕ				Додаткові технологічні операції до, під час або після процесу МАСЕ				
	$t_{\text{трав.1}}$ , с	$t_{\text{трав.2}}$ , хв	$AgNO_3$ , мг	$H_2O_2$ , мл	Текстурування	Додатковий травник	ПАР	Варіант обробки	Видалення срібла
1-1	20	30	68	0.8	-	-	-	двохстор.	-
1-2	20	30	68	0.8	-	-	-	двохстор.	+
1-3	20	30	68	0.8	-	-	-	одностор.	+
2-1	60	30	68	0.8	-	-	-	двохстор.	-
2-2	60	30	68	0.8	-	-	-	двохстор.	+
2-3	60	30	68	0.8	-	-	-	одностор.	+
7	20	90	68	0.8	-	-	-	двохстор.	+
9	20	90	68	0.8	-	-	+	двохстор.	+
11-1	20	90	68	0.8	+	кислотний	-	двохстор.	+
11-2	20	90	68	0.8	+	лужний	-	двохстор.	+
11-3	20	90	68	0.8	+	-	-	двохстор.	+
12-1	20	90	68	0.8	-	кислотний	-	двохстор.	+
12-2	20	90	68	0.8	-	лужний	-	двохстор.	+

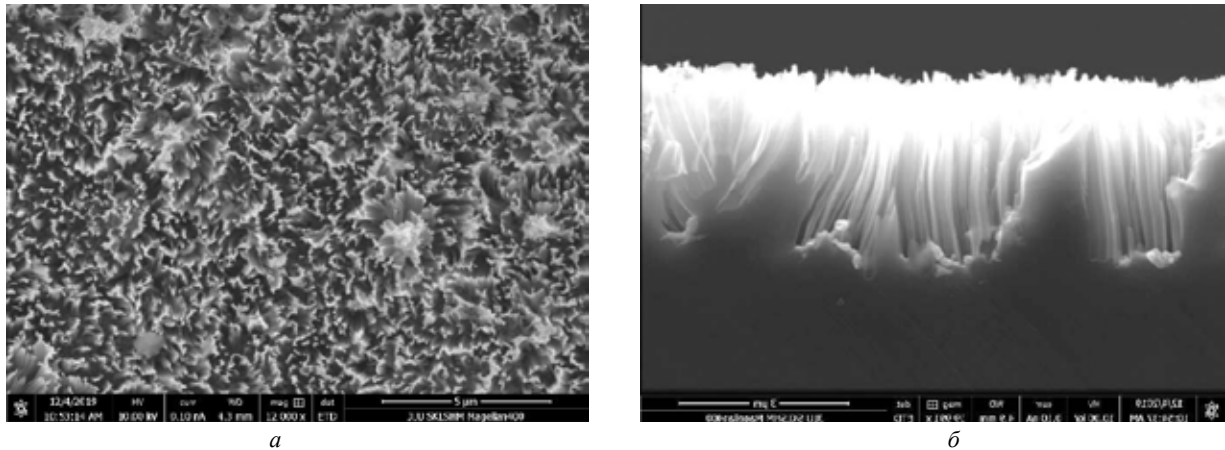


Рис. 1. СЕМ-зображення Si пластини після процесу MACE:  
а) вид зверху, б) вид у розрізі

(двохстороння обробка), однак для виготовлення діодних структур наявність структурованої тильної сторони може сильно вплинути на електричні характеристики готових сенсорів. Тому в роботі було використано також односторонню обробку кремнієвої пластини.

Після операції MACE на поверхні структурованої кремнієвої підкладки залишаються наночастинки срібла, які видалялись шляхом витримки в концентрованій  $\text{HNO}_3$  протягом 1 год. На окремій групі зразків ці залишки не видалялись для перевірки впливу їх на оптичні характеристики сенсорів.

Під час процесу MACE морфологія поверхні кремнію була сильно змінена: від атомарно гладкої до високоструктурованої (масив нанониток). Особливості поверхневої морфології кремнієвої пластини досліджували за допомогою СЕМ-зображень (рис. 1). Видно, що поверхня кремнію складається з одновимірних структур (світлі ділянки), розділених витравленими проміжками (темні ділянки) (рис. 1, а). На поперечному розрізі видно, що отримано масив нанониток (рис. 1, б). Висота нанониток становила від 3,2 до 3,9 мкм, а ширина – 0,1 мкм. В результаті середнє значення співвідношення сторін було близько 50.

Після синтезу кремнієвих нанониток в підкладці р-типу було сформовано р-п-перехід. Для цього здійснювалась дифузія фосфору зі сторони SiNWs в дифузійній печі із застосуванням рідкого джерела в два етапи. На першому етапі відбувалась загонка домішків Р за температури 750 °С протягом 5 хв. На наступному етапі здійснювалась розгонка домішків Р за температури 830 °С протягом 20 хв. В результаті сформовано кремнієвий шар п-типу з питомим поверхневим опором 50 Ом·м.

Зі сторони підкладки наносився суцільний тильний Al контакт до дослідного зразку за допомогою

методу магнетронного розпилення. Робочі параметри у вакуумній установці під час осадження були наступними: напруга 400 кВ, струм 4 А, тиск аргону  $3 \times 10^{-7}$  мм. рт. ст., час осадження 40 хв. Далі алюмінієва плівка відпалювалась в дифузійній печі при 650 °С в атмосфері азоту. В результаті отримано тильний контакт товщиною 1,5 мкм.

Для формування точкових фронтальних контактів зі сторони нанониток було здійснено осадження металеві структури Ti/Ni. Для цього використовували метод електронно-променевого осадження. Плівки Ti та Ni осаджували у вакуумній установці за наступних параметрів: тиск в камері  $10^{-5}$  мм. рт. ст., напруга 13 кВ, струм 120 мА. Час осадження для титану та нікелю становив 3 та 20 хв відповідно. В результаті отримали товщину фронтального контакту близько 0,5 мкм. Схематичне зображення структури одержаних сенсорів наведено на рис. 2.

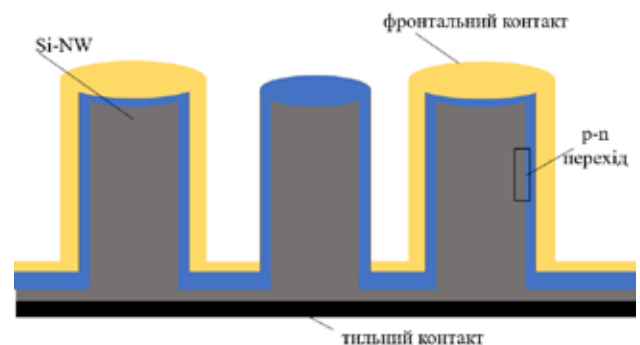


Рис. 2. Структура сенсора освітленості на основі кремнієвих нанониток

Дослідження сенсорів освітленості на основі кремнієвих нанониток. На основі масиву кремнієвих нанониток були виготовлені резистивні

та діодні сенсори освітленості. Вимірювали їх в трьох режимах – фоторезистивному, фотодіодному та фотогенераторному. Фоторезистивний та фотодіодний режими передбачають наявність зовнішнього джерела живлення, але вимірювання в фоторезистивному режимі відбувається за допомогою двох фронтальних контактів, а в фотодіодному – за допомогою фронтального і тильного контактів (рис. 2). В фотогенераторному режимі відсутнє джерело живлення, тобто сенсор по суті являє собою фотоелектричний елемент, оскільки перетворює енергію сонячного світла безпосередньо в електричну енергію. Для вимірювання використовуються ті ж контакти, що й в фотодіодному режимі.

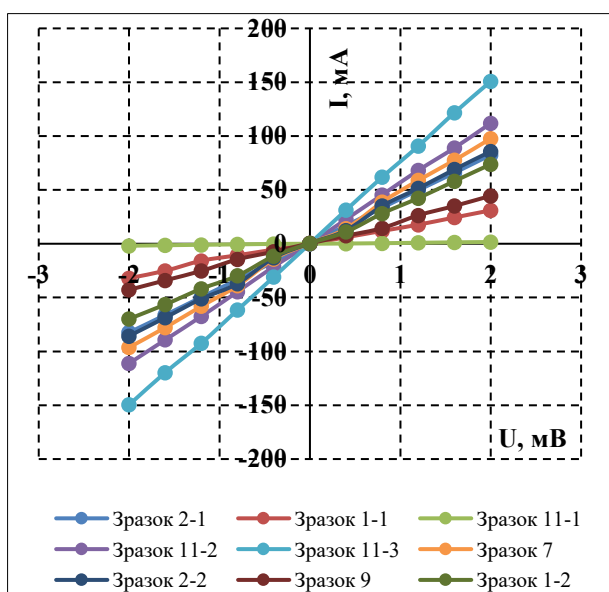
**Сенсори освітленості резистивного типу.** Принцип дії такого сенсора полягає у появі фотонапруги під дією освітлення внаслідок внутрішнього фотоефекту.

Електричні та фоточутливі властивості сенсорів освітленості резистивного типу на основі SiNWs в залежності від технологічних режимів МАСЕ вивчалися на основі темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) та люкс-амперних характеристик (ЛАХ), наведених на рис.3, та розрахованих відповідних коефіцієнтів (табл. 2).

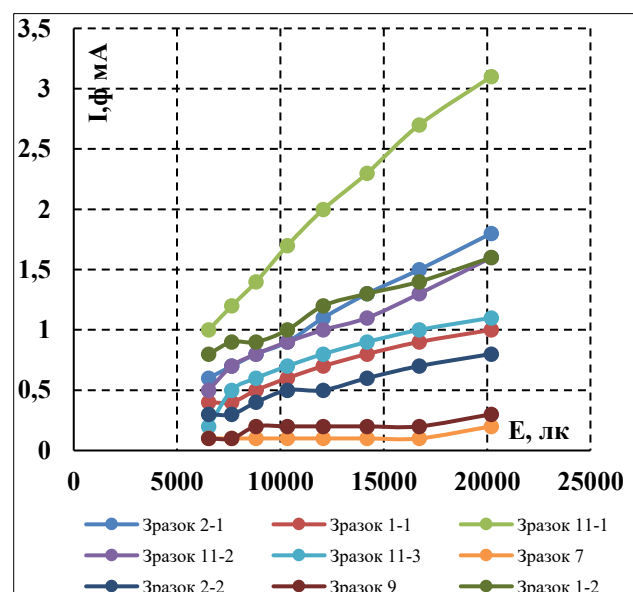
Одержані резистивні структури на основі кремнієвих нанониток характеризуються лінійними та симетричними темновими ВАХ. Характерною особливістю таких резистивних елементів є протікання значних струмів, що свідчить про забезпечення високої провідності носіїв заряду крізь масив нанониток.

В роботі були одержано опір масиву кремнієвих нанониток з розкидом у два порядки в залежності від параметрів їх синтезу (від 13 до 1333 Ом). Так, текстурування поверхні перед операцією МАСЕ призводить до зменшення опору сенсору з 20 до 13 Ом. Зростання тривалості обох стадій операції МАСЕ також призводить до зменшення опору сенсора: зростання часу осадження наночастинок срібла з 20 до 60 с викликало падіння опору з 68 до 24 Ом, а зростання тривалості травлення кремнію з 30 до 90 хв викликало падіння опору з 28 до 20 Ом. Встановлені закономірності, очевидно, пов'язані з формуванням в таких режимах більш структурно розвиненої поверхні, яка забезпечує вищу провідність. Дійсно, відомо, що більший час травлення кремнію призводить до формування нанониток більшої висоти, а час осадження наночастинок срібла на першій стадії МАСЕ відповідає за щільність їх на поверхні.

З іншого боку, використання додаткових травників та ПАР призводить до зростання електричного опору масиву кремнієвих нанониток. Зокрема використання лужного травника призвело до збільшення опору з 13 до 18 Ом, а кислотного – на два порядки (з 13 до 1333 Ом). Відомо, що додаткова хімічна обробка призначена для згладжування поверхні пластини, що ймовірно викликає погіршення умов для протікання струму. Різниця у впливі різних видів травників пов'язана з механізмом їх травлення: в кислотному травнику має місце ізотропне, а в лужному – анізотропне травлення поверхні.



а



б

Рис. 3. ВАХ (а) і ЛАХ (б) сенсорів освітленості резистивного типу

Електричні та фоточутливі параметри сенсорів освітленості резистивного типу

№ зразку	2-1	1-1	11-1	11-2	11-3	7	2-2	9	1-2	12-2
R <sub>t</sub> , Ом	24	68	1333	18	13	20	23	45	28	38
Кф, мА/лмВ	0,8	0,58	1,33	0,61	0,63	0,08	0,44	0,18	0,73	0,59

Фотовідгук сенсора освітленості оцінювався на основі ЛАХ, звідки були розраховані коефіцієнти фоточутливості за формулою:

$$K_s = \frac{I_{\varphi 2} - I_{\varphi 1}}{(E_2 - E_1) \times U \times S}. \quad (3)$$

де  $I_{\varphi 2}$ ,  $I_{\varphi 1}$  – різниця фотострумів;  $E_2$ ,  $E_1$  – різниця освітленості;  $U$  – робоча напруга;  $S$  – площа сенсора. Як видно з наведених графіків на рис. 3(б), ЛАХ сенсорів резистивного типу є переважно лінійними, однак з різним нахилом, що свідчить про значний вплив технологічних режимів синтезу SiNWs на їх фоточутливі властивості. Зокрема було встановлено, що наявність текстури збільшує коефіцієнт фоточутливості у 8 разів (з 0,08 до 0,63 мА/лмВ). Це пов'язано з формуванням геометричної пастки для падаючого світла за допомогою пірамідок текстури, викликає збільшення коефіцієнту поглинання поверхнею сенсора. Також видно з табл. 2, що технологічні операції, які призводили до зростання темного опору, забезпечують зростання фотовідгуку. Так, додавання до розчину другої стадії МАСЕ ізопропилового спирту підвищило фоточутливість вдвічі (з 0,08 до 0,18 мА/лмВ), як і обробка в кислотному травнику (з 0,63 до 1,33 мА/лмВ). В той же час, наявність на поверхні кремнієвих нанониток залишків срібних наночастинок погіршило фоточутливість, що може бути пояснене їх впливом на відбивання світла від поверхні. При цьому зростання тривалостей обох стадій МАСЕ переважно погіршило фоточутливість сенсорів, особливо часу травлення кремнію – на порядок (з 0,73 до 0,08 мА/лмВ). Очевидно, більш розвинена структура поверхні не дає переваг для сенсорів резистивного типу, бо струм знімається в повздовжньому напрямку. Максимальний фотовідгук сенсора освітленості резистивного типу спостерігався для текстурованої підкладки з обробкою в кислотному травнику (1,33 мА/лмВ).

**Сенсори освітленості діодного типу.** Принцип дії такого сенсора полягає в наступному: завдяки дії освітлення в напівпровіднику генеруються фотоносії, що вносять свій вклад в зворотній струм р-п переходу в залежності від рівня

освітленості. Електричні та фоточутливі властивості сенсорів освітленості діодного типу на основі SiNWs в залежності від технологічних режимів МАСЕ вивчалися на основі темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) та люкс-амперних характеристик (ЛАХ), наведених на рис. 4, та розрахованих відповідних коефіцієнтів (табл. 3).

Одержані діодні структури на основі кремнієвих нанониток характеризуються випрямляючими властивостями, що видно з наведених темнових ВАХ (рис.4,а). Коефіцієнти випрямлення визначалися як відношення прямого струму до зворотного за напруги 1,2 В і в залежності від технологічних режимів лежали в межах одиниць до  $10^3$  (табл. 3). Величина фотовідгуку визначалась як відношення світлового до темного зворотного струму за напруги 1,2 В при рівні освітленості 20200 лк. Кф визначався за формулою (3). Як видно з табл. 3, наявність текстури призводить до покращення як електричних, так і фоточутливих характеристик сенсора, а саме: збільшення коефіцієнту випрямлення з 902 до 1893, зростання зворотного струму при опроміненні світлом з 7 до 36 разів та збільшення коефіцієнта фоточутливості сенсора на 30 % (з 0,66 до 0,9 мА/лмВ). Встановлені закономірності пов'язані з формуванням геометричної пастки для падаючого випромінювання за рахунок пірамідок текстури.

Також в роботі було показано, що значний позитивний вплив на параметри сенсора здійснює збільшення тривалостей обох стадій операції МАСЕ, що відповідають за геометрію масиву кремнієвих нанониток. Так, зі збільшенням часу осадження наночастинок срібла з 20 до 60 с значно зростає коефіцієнт випрямлення (з 3 до 62). Також зі збільшенням тривалості першого етапу поступово зростає Кф (з 1,5 до 1,9 мА/лмВ) і фотовідгук (з 1,09 до 3,65). Також значний вплив здійснює збільшення часу травлення з 30 до 90 хв на параметри сенсора: різко зростає коефіцієнт випрямлення (з 2,5 до 902) та фотовідгук (з 1,09 до 7,1). Спостережувані закономірності, очевидно, обумовлені, більш розвиненою структурою масиву кремнієвих нанониток, що дозволяє краще поглинати світло.

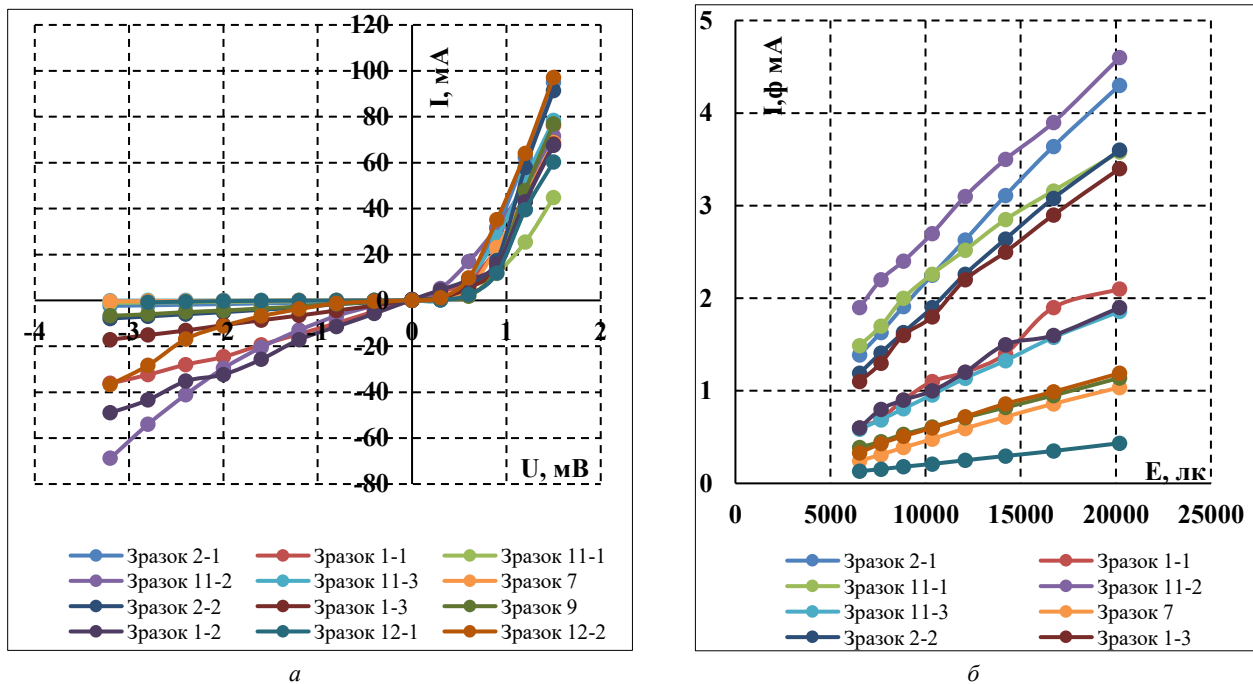


Рис. 4. VAX (а) і LAX (б) сенсорів освітленості діодного типу

На відмінну від резистивного типу сенсорів, додавання до другого розчину в операції MACE ізопропилового спирту в діодному типі сенсорів призвело до зменшення коефіцієнта випрямлення з 902 до 18 та погіршенню фотовідгуку з 7,1 до 1,3 разів.

Крім того, як видно з табл. 3, наявність додаткового травника для текстурованих підкладок значно погіршило і електричні, і фоточутливі параметри приладу, особливо використання лужного травника. Так, коефіцієнт випрямлення сенсора без використання травників становив 1893 і зменшувався до 67 після обробки в кислотному травнику і до 4 – в лужному травнику. При цьому фотовідгук погіршився з 36,04 до 6,4 (кислотний травник) і до 1,15 (лужний травник). Зазначені тенденції пов'язані з тим, що обробка в травниках та додавання ПАР, які покликані згладжувати поверхню сенсора, негативно впливають на структурне розгалуження масиву кремнієвих наноніток на текстурі, а відтак і на коефіцієнт поглинання світла. Слід зазначити, що обробка кремнієвої пластини без попереднього текстуровання в лужному травнику викликає значне

зростання коефіцієнту фоточутливості (з 0,6 до 4 мА/лмВ), що, очевидно, пов'язано з анізотропним характером травлення.

В роботі також було показано, що формування масиву кремнієвих наноніток лише з фронтальної сторони пластини (одностороння обробка) покращує як електричні, так і фоточутливі характеристики сенсорів освітленості: зростає Квипр від 3,16 до 6,55, а також Кф з 1,5 до 1,8 мА/лмВ. Очевидно, хімічне травлення тильної сторони пластини під час операції MACE погіршує умови протікання струму до тильного контакту приладу.

Максимальний фотовідгук сенсора освітленості діодного типу спостерігався для текстурованої підкладки без обробки в травниках та додавання ПАР (36,04), а максимальна фоточутливість становила 4,3 мА/лмВ для не текстурованої кремнієвої пластини з обробкою в лужному травнику.

**Сенсори освітленості фотоелектричного типу.** Принцип дії такого сенсора полягає у появі фотоносіїв під дією освітлення і розділення їх внутрішнім полем р-п-переходу, що призводить до появи різниці потенціалів, яку називають фото-ЕРС. Фоточутливі властивості сенсорів

Таблиця 3

## Електричні та фоточутливі параметри сенсорів освітленості діодного типу

№ зразку	2-1	1-1	11-1	11-2	11-3	7	2-2	1-3	9	1-2	12-1	12-2
Квипр	62	3	67	4	1893	902	19	7	18	2,5	358	17
Ісв/Ітем	3,65	1,09	6,4	1,15	36,04	7,1	1,7	1,3	1,3	1,05	9,68	1,1
Кф, мА/лмВ	1,9	1,5	1,3	1,5	0,9	0,66	2,1	1,8	0,7	1,2	0,6	4,3

освітленості фотоелектричного типу на основі SiNWs в залежності від технологічних режимів MACE вивчалися на основі залежностей напруги розімкнутого кола та струму короткого замикання від потужності сонячного випромінювання, наведених на рис. 5. На основі фотоелектричних вимірювань були розраховані коефіцієнт фоточутливості сенсора в фотогенераторному режимі і відносна зміна напруги розімкнутого кола (табл. 4):

$$K_{\phi} = \frac{j_{кз2} - j_{кз1}}{p_2 - p_1} \quad (4)$$

де  $j_{кз2}$ ,  $j_{кз1}$  – різниця густини струму короткого замикання;  $p_1$ ,  $p_2$  – різниця густини потужності сонячного випромінювання.

$$\Delta U_{рк} = \frac{U_{рк2} - U_{рк1}}{U_{рк1}} \times 100\% \quad (5)$$

де  $U_{рк2} - U_{рк1}$  – різниця напруги розімкнутого кола.

Одержані діодні структури на основі кремнієвих нанониток проявляють фотоелектричні властивості, що видно з наведених графіків (рис. 5) та табл.4. Фотоелектричні параметри сенсорів, визначені за стандартних умов вимірювання (спектр AM1,5, потужність сонячного випромінювання 1000 Вт/м<sup>2</sup>), знаходились в межах: напруга розімкнутого кола 125...482 мВ та густина струму короткого замикання 1,5...18,5 мА/см<sup>2</sup> в залежності від технологічних режимів синтезу кремнієвих нанониток. Як видно з наведених графіків на рис. 5, одержані фотоелектричні структури можуть бути використані в якості сенсорів освітлення, оскільки фотоЕРС та струм короткого замикання значно змінюються зі зміною потужності сонячного випромінювання, причому останній параметр змінюється по лінійному закону. Згідно даних табл.4 випливає, що наявність текстури призводить до покращення більшості характеристик сенсора, а саме: збільшення  $J_{кз}$  з 2,7 до

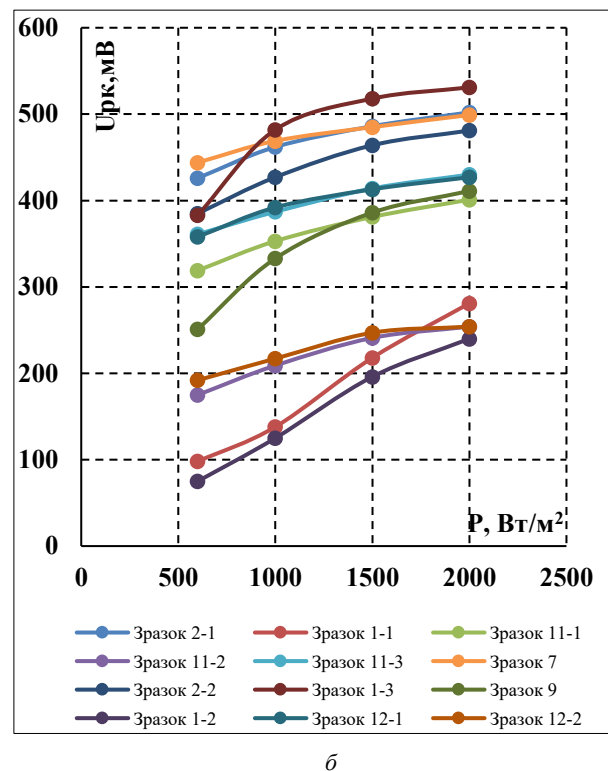
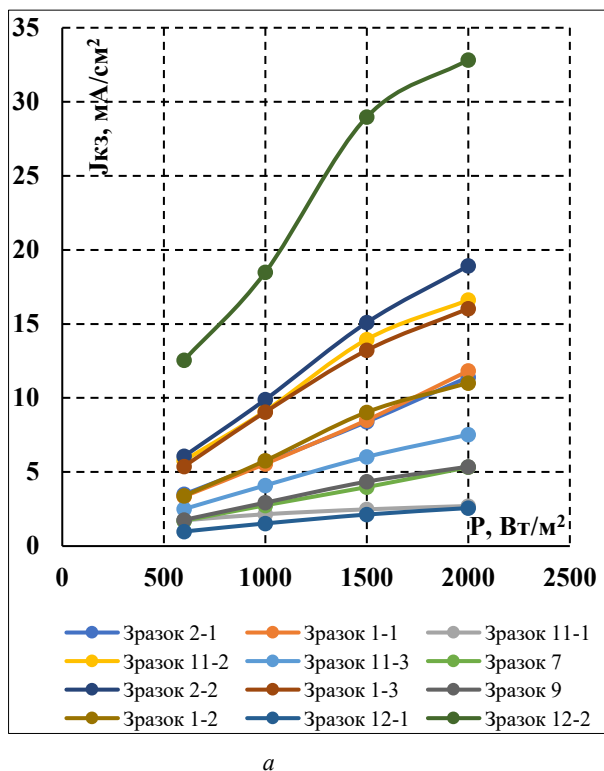


Рис. 5. Фоточутливі параметри сенсорів освітленості фотоелектричного типу

Таблиця 4

Фоточутливі параметри сенсорів освітленості фотоелектричного типу

№ зразку	2-1	1-1	11-1	11-2	11-3	7	2-2	1-3	9	1-2	12-1	12-2
U <sub>рк</sub> , мВ	462	138	353	209	387	469	427	482	333	125	392	217
J <sub>кз</sub> , мА/см <sup>2</sup>	5,6	5,5	2,1	9,1	4,1	2,7	9,9	9,1	2,9	5,8	1,5	18,5
K <sub>ф</sub> , мА/Вт	56,5	60,6	6,9	77,4	35,9	25,8	91,8	76,04	25,6	54,41	11,31	144,9
δU <sub>рк</sub> , %	17,8	186,7	25,7	45,1	19,1	12,4	24,9	38,6	63,7	220	19,2	32,2



4,1 мА/см<sup>2</sup>, збільшення Кф з 25,8 до 35,9 мА/Вт і збільшення  $\delta U_{рк}$  в 1.5 рази.

При цьому текстурування підкладок перед процесом синтезу кремнієвих нанониток зменшує  $U_{рк}$  з 469 до 387 мВ. Спостережувані закономірності узгоджуються з аналогічним впливом текстури на поліровані сонячні елементи. Також в роботі було встановлено вплив часу осадження наночастинок Ag на величину фоточутливості. Зростання тривалості першого етапу MACE з 20 до 60 с погіршило обидва показники чутливості сенсора: зменшується  $\delta U_{рк}$  з 186 до 17,8 % та зменшується Кф з 60,6 до 56,5 мА/Вт.

Слід зазначити, що з точки зору сонячних елементів, більша тривалість першого етапу MACE збільшує абсолютне значення фотоЕРС до 462 мВ. Аналогічна тенденція спостерігалась для тривалості другої стадії операції MACE. Зростання тривалості другого етапу MACE з 30 до 90 хв погіршило обидва показники чутливості сенсора: зменшується  $\delta U_{рк}$  з 220 до 12,4 % та зменшується Кф з 54,41 до 25,8 мА/Вт. Слід зазначити, що з точки зору сонячних елементів, більша тривалість другого етапу MACE також збільшує абсолютне значення фотоЕРС до 469 мВ. Таким чином, більш розвинена структура масиву SiNWs покращує фото-ЕРС сонячного елемента, однак погіршує фоточутливі параметри сенсорів фотоелектричного типу.

Попередня обробка поверхні кремнієвої пластини кислотним та лужним травником призвела до різного впливу на фоточутливі характеристики одержаних структур. Було показано, що кислотний травник призводив до погіршення фоточутливості та фотоелектричних параметрів сенсора, в той час як лужний травник, який забезпечує анізотропне травлення, навпаки призводить до покращення коефіцієнтів фоточутливості та струму короткого замикання. З табл. 3 видно, що обробка в лужному травнику забезпечила одержаним сенсорам найбільшу величину  $J_{кз}$  18,5 мА/см<sup>2</sup> та Кф 144,9 мА/Вт.

В роботі також було показано, що формування масиву кремнієвих нанониток лише з фронтальної сторони пластини (одностороння обробка) покращує як фотоелектричні, так і фоточутливі характеристики сенсорів освітленості: зростає напруга розімкнутого кола з 125 до 482 мВ, густина струму короткого замикання з 5,8 до 9,1 мА/см<sup>2</sup>, а також Кф з 54,41 до 76,04 мА/Вт. Очевидно, хімічне травлення тильної сторони пластини під час операції MACE погіршує умови протікання струму до тильного контакту пристрою. Максимальна фоточутливість сенсора освітленості фотоелектричного типу мала місце для нетекстурованої підкладки з обробкою в лужному травнику (144,9 мА/Вт).

#### Висновки.

В даній роботі були синтезовані кремнієві 1D нанорозмірні структури для застосування в сенсорах освітленості резистивного, діодного та фотоелектричного виду. Кремнієві нанонитки були синтезовані методом метало-стимульованого хімічного травлення. Були досліджені електричні та фоточутливі характеристики сенсорів освітленості на основі SiNWs в залежності їх від технологічних режимів синтезу. Максимальний фотовідгук сенсора освітленості резистивного типу спостерігався для текстурованої підкладки з обробкою в кислотному травнику (1,33 мА/лмВ). Максимальний фотовідгук сенсора освітленості діодного типу спостерігався для текстурованої підкладки без обробки в травниках та додавання ПАР (36,04), а максимальна фоточутливість становила 4,3 мА/лмВ для нетекстурованої кремнієвої пластини з обробкою в лужному травнику. Максимальна фоточутливість сенсора освітленості фотоелектричного типу мала місце для нетекстурованої підкладки з обробкою в лужному травнику (144,9 мА/Вт). Напрямок подальших досліджень є застосування різних видів модифікації поверхні кремнієвих нанониток.

#### Список літератури:

1. Mohamed, Ben Rabha, Hajjaji Anouar, and Bessais Brahim, Improvement of multicrystalline silicon solar cell performance via chemical vapor etching method-based porous silicon nanostructures. *Solar Energy* 86.5. 2012. Pp. 1411–1415.
2. Jaballah, Abdelkader Ben, et al. Formation, rapid thermal oxidation and passivation of solar grade silicon nanowires for advanced photovoltaic applications. *Solar energy* 86.6.2012. Pp. 1955–1961.
3. M.G. Dusheiko, V.M. Koval, T.Yu. Obukhova. Silicon nanowire arrays synthesized using the modified MACE process: Integration into chemical sensors and solar cells. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. V. 25, No 1. 2022. P. 058–067.
4. Bu, Ian YY, and T. J. Hsueh. Ebeam fabrication of silicon nanodome photovoltaic devices without metal catalyst contamination. *Solar energy* 86.5 .2012. Pp. 1454–1458.

5. HOU, Huilin, et al. One-dimensional mesoporous inorganic nanostructures and their applications in energy, sensor, catalysis and adsorption. *Progress in Materials Science*, 113. 2020. P. 100671.
6. Y. Lee, H. Kim, et al.. Study of metal assisted anisotropic chemical etching of silicon for high aspect ratio in crystalline silicon solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 40. 2015. Pp. 391–396.
7. Mohammed, Ahmed AS, Walied A. Moussa, and Edmond Lou. High sensitivity MEMS strain sensor: design and simulation. *Sensors* vol. 8.4. 2008. Pp. 2642–2661.
8. Yuxiang Qin, et al, Ultrasensitive ethanol sensor based on nano-Ag&ZIF-8 co-modified SiNWs with enhanced moisture resistance, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 340. 2021. P. 129959.
9. Yuxiang Qin, et al, Enhanced humidity resistance of porous SiNWs via OTS functionalization for rarefied NO<sub>2</sub> detection, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 283. 2019. Pp. 61–68.
10. T. Obukhova et al., Melanin-based Organic-inorganic Structures for Sensor Application, *IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties*, 2021. Pp. 1–3.
11. Krithikadevi Ramachandran, et al, Fabrication of highly oriented 1D SiNW arrays/Au for femto molar level detection of H1N1 protein, *Materials Letters*, vol. 300. 2021. P. 130184.
12. De Santiago, Francisco, et al. Silicon nanowires as acetone-adsorptive media for diabetes diagnosis. *Applied Surface Science* vol. 547 . 2021. P. 149175.
13. Jeribi, Mondher, et al. Response modulation of silicon nanowires-based sensor to carbon number in petroleum vapor detection. *Fuel* vol. 304. P. 121260. November 2021.
14. Xinxin Xing, Xuechun Xiao, Lihong Wang, Yude Wang, Highly sensitive formaldehyde gas sensor based on hierarchically porous Ag-loaded ZnO heterojunction nanocomposites, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 247, 2017. Pp. 797–806.
15. Mansoor, Mohtashim, et al. Silicon diode temperature sensors—A review of applications. *Sensors and Actuators A: Physical* vol. 232, 2015. Pp. 63–74.
16. V.Koval, Yu. Yakymenko, A. Ivashchuk, M. Dusheyko, O. Masalskyi, M. Koliada, D. Kulish. Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon for Photovoltaic Application . 2019 IEEE 39th *International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Conference Proceedings*, 16–18. 2019. Pp. 282–287 .
17. E.T.Yu and J. van de Lagemaat. Photon management for photovoltaics. *MRS Bulletin*, vol. 36. 2011. Pp. 424–428.
18. C. Amri, R. Ouertani, et al. Effect of Silver-Assisted Chemical Vapor Etching on morphological properties and silicon solar cell performance. *Nano Letters*. 2017. Pp. 177–179.
19. E. Abdur-Rahman, I. Alghoraibi, and H. Alkurdi. Effect of Isopropyl Alcohol Concentration and Etching Time on Wet Chemical Anisotropic Etching of Low-Resistivity Crystalline Silicon Wafer. *Int J Anal Chem*, vol. 217. 2017. Pp. 1–9.
20. GOMES, Diego R., et al. On the mechanism of ion-induced bending of nanostructures. *Applied Surface Science*, vol. 446. 2018. Pp. 151–159.
21. Leonardi, Antonio Alessio, Maria José Lo Faro, and Alessia Irrera. Silicon nanowires synthesis by metal-assisted chemical etching: a review. *Nanomaterials* 11,2 .2021. P. 383.
22. M. Florides, Silicon Nanowires and Their Applications, University of Cyprus. *Department of Electrical and Computer Engineering*. 2016. Pp. 1–22.
23. Qu, Yongquan, Hailong Zhou, and Xiangfeng Duan. Porous silicon nanowires. *Nanoscale* 3.10. 2011. Pp. 4060–4068.
24. Rai, Sadhna, et al. Study of the morphological, optical, structural and electrical properties of silicon nanowires at varying concentrations of the catalyst precursor. *Materials Advances* 3.6 .2022. Pp. 2779–2785.

**Linevych Ya.O., Koval V.M., Dusheiko M.G., Lakyda M.O.**

### **SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF SILICON 1D NANOSTRUCTURES FOR APPLICATION IN LIGHT SENSORS**

*The article is devoted to the manufacture and research of light sensors based on silicon 1D nano structures. Silicon nanowires were synthesized by metal-assisted chemical etching (MACE). On the basis of silicon 1D nanoscale structures, resistive, diode, and photoelectric light sensors were manufactured. For the synthesis of sensors, the following operations were carried out: chemical cleaning of the surface of silicon plates; standard or modified metal-stimulated chemical etching for the synthesis of silicon nanowires on the surface of silicon wafers; operation of diffusion to create a p-n junction in nanowires; application of frontal and rear metallization. Electrical and photosensitive parameters were calculated for the received sensors: dark resistivity, rectification coefficient, photoresponse, photosensitivity coefficient. The influence of the technological parameters of the synthesis of silicon nanowires on the performance characteristics of light sensors based on them was determined. In particular, the influence of plate surface texturing, duration of the*

---

*first and second stages of MACE, treatment in isotropic/anisotropic etchants, addition of surfactant, one- or two-sided treatment of a plate during MACE, and removal of silver nanoparticle residues are shown. The maximum photoresponse of the resistive light sensor was observed for the textured substrate treated in acid etchant (1.33 mA/lmV). The maximum photoresponse of the diode-type illumination sensor was observed for the textured substrate without treatment in etchants and the addition of surfactants (36.04). The maximum photosensitivity was 4.3 mA/lmV for an untextured silicon wafer treated in alkaline etchant. For sensors of the photovoltaic type, the maximum coefficient of photosensitivity (144.9 mA/W) was obtained for a non-textured substrate treated in alkaline etchant.*

**Key words:** *one-dimensional (1D) nanostructures, silicon nanowires, metal-assisted chemical etching, light sensors, photosensitivity.*

## ПЕРСОНАЛІЇ

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/51>

### **Шимчак Пьотр**

Асоціація електриків Польщі (SEP), Польща

### **Блінцов В.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

### **Бойко А.О.**

Національний університет «Одеська політехніка»

### **Буруніна Ж.Ю.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## **МИХАЙЛО ДОЛІВО-ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ: ОСОБИСТІТЬ СВІТОВОГО МАСШТАБУ (до 160-річчя від дня народження науковця та 130-річчя першої передачі електроенергії трифазним струмом)**

*Викладено основні етапи життя і професійного становлення видатного інженера і науковця, винахідника трифазного струму Михайла Доліво-Добровольського. Надані відомості про його батьків, описані маловідомі для українського читача факти з його дитинства та юності. Наведено відомості про здобуття освіти в Одесі та Ризі, про перші спроби виконання студентських прикладних наукових досліджень та їх визнання. Більш детально подано інформацію про здобуття Михайлом Доліво-Добровольським електротехнічної освіти та про перший етап професійної діяльності як викладача Дармиштадтського технологічного університету. Показано роль провідного професора Еразмуса Кітлера у становленні молодого електротехніка.*

*Наведено відомості про роботу Михайла Доліво-Добровольського у новоствореній німецькій компанії *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG)*. Коротко описано його творчу діяльність по створенню простого у використанні, дешевого у виробництві та експлуатації трифазного асинхронного двигуна із білковою кліткою. Надано відомості про створення системи трифазного струму для живлення трифазного асинхронного двигуна. Наведено інформацію про розробку та побудову трифазних трансформаторів, які дали змогу передавати електричну енергію на великі відстані.*

*Описано внесок Михайла Доліво-Добровольського у реалізацію унікального експерименту – першої у світі передачі електричної енергії трифазного струму на відстань 175 кілометрів. Наведено короткі відомості про конструкцію синхронного генератора як джерела електричної енергії, який приводиться в рух гідравлічною турбіною. Подано інформацію про побудову першої у світі високовольтної лінії електропередачі, яка забезпечила живлення електричною енергією Всесвітню електротехнічну виставку, організовану в 1891 році у Франкфурті-на-Майні.*

*Приводяться короткі відомості про розробку Михайлом Доліво-Добровольським низки нових типів трифазних двигунів і трансформаторів, а також вимірювальних приладів.*

*Надано інформацію про основні наукові публікації Михайла Доліво-Добровольського та про його професійні оцінки проектів гідроелектростанцій трифазного струму тих часів. Подано інформацію про інженерів, науковців і менеджерів – творців трифазного струму тих часів. Наведено короткі відомості про особисте життя видатного електротехніка.*

*Описано заходи щодо шанування пам'яті великого інженера, науковця та винахідника польського походження.*

**Ключові слова:** трифазний струм, асинхронна електрична машина, передача електричної енергії.

### Вступна частина

Світова історія електротехніки наповнена видатними технічними рішеннями, які своєю ефективністю забезпечили прогрес цивілізації та, одночасно, дають змогу ознайомитись з унікальними людьми – науковцями та інженерами, особистий внесок яких у прогрес не можна переоцінити. До таких рішень, безумовно, належить поява та швидкий триумф трифазного струму як основного варіанту широкого використання електроенергії у промисловості та побуті. Що ж до видатних особистостей, причетних до цього триумфу, то сучасна історія електротехніки виділяє постать Михайла Доліво-Добровольського, видатного електротехніки та родоначальника трифазного змінного струму. Технічні рішення цього талановитого інженера і винахідника, запропоновані ним для трансформації трифазного струму та асинхронних машин більш ніж 130 років тому, і сьогодні практично без змін використовуються у промисловості! Це обумовлює інтерес до його біографії та стимулює до вивчення його творчого шляху.

### Основна частина

Розташоване за 36 км від Санкт-Петербурга, невелике містечко Гатчина в середині XIX століття славилося прекрасним палацово-садовим комплексом. Діяла також професійна школа-інтернат. Її директором був Юзеф Доліво-Добровольський, дружина якого Ольга Михайлівна подарувала йому 2 січня 1862 року (21 грудня 1861 р. по новому стилю) свого первістка, Михайла. Юзеф Добровольський був нащадком одного з численних польських дворянських родів, які жили

у Великій Польщі, Сілезії та Мазовії протягом тривалого часу, а пізніше – на східних територіях Польщі.

Дідусь Михайла Флоріан займав високу посаду інспектора польової пошти в царській армії і неодноразово був нагороджений за заслуги у війні з Наполеоном. Його син і батько Михайла, перш ніж стати освітянином, також служив у російській армії, брав участь у Кримській війні і прийшов на державну службу в званні полковника. Михайло не зміг піти по стопах свого батька та діда. Його здоров'я зробило це неможливим – у нього з дитинства були хвороби серця.

У 1872 році сім'я Доліво-Добровольських переїхала в Одесу, де батько Осип Фролович з 1877 по 1880 рр. працював редактором – видавцем щоденної міської газети «Правда» та приймав участь в громадському житті міста. Михайло в 1873 вступив до початкового шестикласного середнього навчального закладу (з 1876 р – Одеське реальне училище св. Павла), який було засновано при євангелічно-лютеранській церкві св. Павла у Лютеранському кварталі міста, рис. 1.

*На жаль, ні самого реального училища св. Павла, ні його будівлі, до сьогоднішнього дня не збереглося. Воно припинило своє існування з приходом радянської влади. Навчальний заклад було перетворено у IV профтехнічну школу «Металістів». У 30-тих роках в будівлі розмістилася етнічна німецька середня школа № 38, а потім загальна середня школа № 5 з українською мовою навчання. У роки війни та окупації Одеси у будівлі бувшого училища розміщувалася німецька морська піхота. У ці ж роки будівля була зруйнована*



а – внутрішній двір Одеського реального училища св. Павла



б – центральний лютеранський кафедральний собор Св. Павла

Рис. 1. Місця перебування Михайла Доліво-Добровольського в Одесі

внаслідок авіанальоту. У 1953 році на місці руїн було збудовано будівлю головного корпусу Одеського електротехнічного інституту зв'язку ім. А.С. Попова (сьогодні – Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова.)

Можна вважати, що з того часу, коли Михайло навчався в м. Одесі, розпочався період його становлення як дослідника.

Реальне училище (від нім. Realschule) у дореволюційній Росії – середній чи неповний середній навчальний заклад, у якому істотна роль відводилася предметам природного і математичного спрямування. Навчання орієнтувалося на прикладні дисципліни – механіку, хімію, а також технологічні та комерційні предмети. Будучи учнем реального училища, Михайло зацікавився хімією – галуззю знань, яка дуже динамічно розвивалася в Росії того часу завдяки досягненням Дмитра Менделєєва. Курс навчання тривав сім років. В процесі навчання Доліво-Добровольський зарекомендував себе як один з кращих учнів, особливих успіхів від досяг у профільних технічних предметах, рис. 2, а.

Особливістю є факт, що випускники тодішніх реальних училищ могли вступати до технічних, промислових та торгових вищих навчальних закладів Російської імперії, але не до університетів. Тому, після блискучого завершення навчання в реальному училищі м. Одеси, 1 вересня 1978 року Михайло зміг продовжити своє навчання в Ризькому технічному училищі (з 1896 року – Ризькій політехнічній інститут) рис. 2, б.

Творчим результатом дворічного навчання Михайла Доліво-Добровольського в Ризі стали його експонати, першим з яких був представлений 1880 року на першій російській електротехнічній виставці в Санкт-Петербурзі, а другий (гальванічний елемент) – на Міжнародній Електротехнічній виставці у Відні (1883.); він отримав за це нагороду, свідоцтво про яку підписав перший президент Австрійської електричної асоціації, видатний фізик проф. Йозеф Стефан.

Початок 1880-х років не був одним з найбільш мирних у царській Росії. Посилювалися акти насильства і терору, організовувалися напади на царя. Спецслужби та поліція відстежували змови та потенційних бомбардувальників. Студентські кола, як найбільш схильні до «нерозумності», зазнали особливого нагляду.

Поляк, який вивчав хімію і який, будучи ще студентом, «грався» з вибухівкою, мав бути підозрюваним і, таким чином, був виключений з Ризького політехнікуму в 1881 році без права вступу до будь-яких вищих навчальних закладів Росії. У такій ситуації Михайло виїжджає з Росії та їде до Німеччини, а саме до Дармштадта (земля Гессен), де в 1877 році була заснована Дармштадтська вища технічна школа. Сьогодні це Дармштадтський технологічний університет) – один з найстаріших і найвідоміших європейських вищих технічних навчальних закладів.

Михайло Доліво-Добровольський навчається в Дармштадті на першій у світі кафедрі електротехніки, організованої там професором Еразмусом



а – учень реального училища



б – студент Ризького технічного училища

Рис. 2. Шкільні та студентські роки Михайла Доліво-Добровольського

Кітлером (Erasmus Kittler, 1852–1929), рис. 3. Він з відзнакою закінчив університет в 1884 році на першому в світі факультеті електротехніки. Саме Кітлер помітив високий інтелектуальний рівень, великі знання та ентузіазм до роботи молодого емігранта з Росії та зробив його своїм асистентом.

На цій посаді Михайло проводив лабораторні заняття та лекції у 1885–1887 роках. Йому було доручено вести курс «Електрохімія з особливою увагою до гальванопластики та металургії». Після трьох років роботи асистентом він вирішує залишити роботу в Дармштадті та шукати кращих можливостей для реалізації своїх амбіцій в електротехнічній промисловості, яка динамічно роз-

вивалась. За рекомендації професора Кітлера він подав заяву до щойно створеної берлінської компанії Deutsche Edison-Gesellschaft für angewandte Elektrizität (DEG), яка у подальшому (1888 р.) була перейменована у всесвітньо відому Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG).

Однак перед тим, як влаштуватися на роботу в цю процвітаючу компанію, він ненадовго повернувся до Одеси, щоб 11 травня 1887 року одружитися зі своїм першим коханням – гречанкою Корнелією. В Одесі з початку її заснування грецька діаспора була дуже велика, заможна та грала не останню роль в житті міста. Наречена Корнелія Фемістоклівна Тумба була не тільки іншою



*M. Dolivo-Dobrowolsky*

a



b



b



2

**Рис. 3. Навчання у Дармштадті:**

а – студентська фотографія Михайла Доліво-Добровольського; б – проф. Е. Кітлер зі своїми учнями (Доліво-Добровольський – перший справа); в – професор Еразмус Кітлер; г – будівля Дармштадтської вищої технічної школи

національності, але й належала до інших суспільних кіл. Так, одна з її сестер на ім'я Калліопа була відомою актрисою і танцівницею. Незабаром після весілля він разом з дружиною їде до Берліна, де у місцевому відділенні AEG займає керівну посаду. Це дає йому можливість проводити дослідження та експериментувати як конструктору та винахіднику, рис. 4.

Система постійного струму домінувала в техніці другої половини 19 століття. Незважаючи на зусилля вчених та інженерів, постійний струм не задовольняв швидко зростаючих потреб – насамперед промисловості. Ця система вимагала – через неможливість постачання електроенергії на відстані, що перевищували приблизно 300 м – розташування відносно великих електростанцій у центрах великих міст, що було надзвичайно обтяжливим для мешканців. Другою серйозною перешкодою, що обмежувала можливості економічного розвитку на основі цієї енергетичної системи, були двигуни постійного струму, які, обладнані механічними комутаторами, були не тільки дорогими, але й обтяжливими в експлуатації. Здатність передавати електрику на відстані, набагато більші, ніж раніше, а також простий і дешевий у виробництві та експлуатації електродвигун – мрія багатьох інженерів-винахідників та підприємців, що працювали на ринку електротехнічних послуг того часу. В цій сфері зустрілися інтереси Доліво-Добровольського та керівництва компанії, яка його найняла.

AEG дозволив Доліво-Добровольському реалізувати свої ідеї. Їм сприяє генеральний директор

Еміль Ратенау, який, відкритий до нових рішень, не боїться ризикувати. Для того, щоб представити на ринок нові продукти, він налагоджує співпрацю з директором швейцарської компанії Maschinen Fabrik Oerlikon (MFO). Ця співпраця дуже швидко принесла не тільки суттєву фінансову вигоду обом конкуруючим компаніям, але й розвиток науки, техніки та промисловості не лише європейської, а й світової.

Відкриття Ніколою Теслою та Галілео Феррарісом обертового магнітного поля, що генерується змінним струмом, стимулювало увагу вчених та винахідників у 1890-х роках, шукаючих шляхів використання його потужності в механічних пристроях для виробництва електроенергії.

Зокрема, з більшим чи меншим успіхом займалися створенням таких пристроїв Charles Schenk Bradley, Nicola Tesla, Friedrich August Haselwander, Jonas Wenström. До цієї групи також належить М. Доліво-Добровольський, який натхненний статтю Г. Ферраріса з березня 1888 р. почав розробляти простий у використанні, дешевий у виробництві та експлуатації трифазний асинхронний двигун із білковою кліткою, який мав діаметр статора 75 мм, довжину 75 мм і потужність приблизно 100 Вт. Для цього першого двигуна, побудованого на початку 1889 року, в якості статора використовувалася кільцева арматура постійного струму з 24 напівзакритими прорізами. Це рішення забезпечило більш сприятливий розподіл магнітного поля в повітряному зазорі. Обмотка була сконструйована таким чином, щоб можна



а



б

Рис. 4. Початок роботи Михайла Доліво-Добровольського в AEG  
а – історична будівля AEG сьогодні; б – з дослідницькою групою AEG



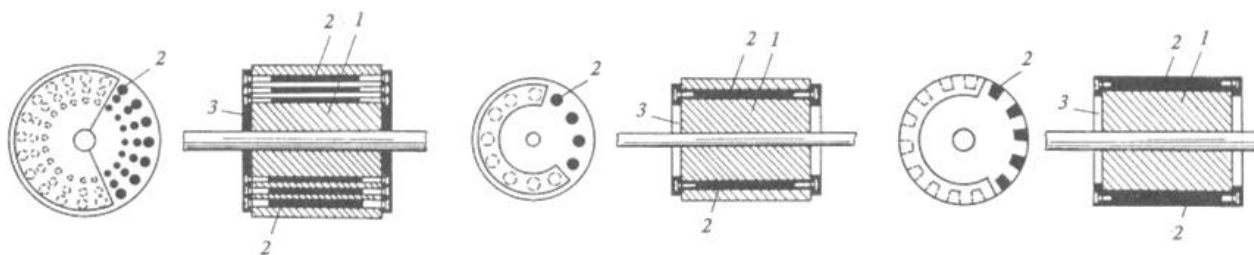


Рис. 5. Білкова клітка трифазного асинхронного двигуна згідно з заявкою на патент Михайла Доліво-Добровольського від 8 березня 1889 р. (Патент Німеччини № 51083)

було досягти перемикання кількості пар полюсів ( $2p = 2$  або  $4$ ) і різну кількість фаз – 2, 3 і навіть 6 і 12. Повітряний зазор становив 1 мм, що на той час було дуже сміливим рішенням.

Асинхронний двигун із білковою кліткою, що працює у трифазній системі змінного струму, патент на який був поданий 8 березня 1889 р., розпочав нову еру в електромеханіці, яка триває донині в епоху змінного струму, рис. 5.

Цього року М. Доліво-Добровольський також побудував абсолютно новий трифазний генератор змінного струму. Машина мала барабанний ротор з обмотками, виведеними на обидва кінці вала, кінці яких з одного боку з'єднані з комутатором, а з іншого – з трьома кільцями, з яких отримувався фазний змінний струм зі зсувом фази на  $120^\circ$ . Проведення експериментальних досліджень стало можливим завдяки трифазному джерелу змінного струму лише з трьома провідниками (сума струмів у трьох фазах дорівнювала нулю), на відміну від рішень Н. Тесли, де при різниці фаз  $60^\circ$  було потрібно шість провідників. Відкриття 3-фазної системи породило нові винаходи та дозволило розробити нові принципи побудови та методи розрахунків не тільки для трифазних двигунів, а й для трансформаторів та генераторів. Доліво-Добровольський будує різні версії двигунів – як різної потужності, так і з новими конструктивними рішеннями, в т.ч. з намотаними роторами (з можливістю підключення пускового резистора), які сьогодні називаються кільцевими роторами, і з двоклітковими роторами, що забезпечують хороші пускові характеристики. Водночас він працює над проектуванням та конструюванням різних варіантів трифазних трансформаторів, починаючи з так званого радіального (німецький патент № 56359 від 29 серпня 1889 р.), і закінчуючи класичними конструкціями сердечників, перша з яких була подана до патентного відомства 4.10.1891 р.

Роботи, виконані Доліво-Добровольським для АЕГ, яка була монополістом не тільки на німець-

кому ринку, приносять компанії значний прибуток (протягом кількох років її статутний капітал збільшується в рази), а їх автору – визнання і славу. Як науковець-винахідник, який користується великим авторитетом, його запрошують взяти участь у Першому Російському конгресі інженерів-електротехніків у січні 1890 року. Він виступає з доповіддю, яка була сприйнята учасниками з великим інтересом. Цей з'їзд став великою подією, про що свідчить урочистий сніданок у Царському Селі (нині Пушкін), у якому прийняли 300 учасників, у тому числі й цар Олександр III.

Кінець 1980-х і початок 1990-х років були особливим періодом у житті Михайла Доліво-Добровольського, сповненими професійних успіхів та здійснення в особистому житті. 23 травня 1891 р. народжується його перший син Дмитро, а через чотири роки, 21 лютого 1895 р. – другий син Серж.

На фотографії з цього періоду (рис. 6) ми можемо побачити задоволеного, усміяного чоловіка, який повністю відповідає опису Джеймса Бірнгольца, близького партнера Доліво-Добровольського в АЕГ: «Високий стрункий чоловік з рідкою бородою і довгим обличчям з парою мудрих, проникливих очей, з яких пролизувала іронія».



Рис. 6. Михайло Доліво-Добровольський – людина успіху

В кінці 19 століття в електроенергетиці панувала система постійного струму, в яку вкладався величезний капітал. Тому для амортизації електрообладнання ніхто не прагнув зробити новачку в цій галузі, тим більше, що це було підтримано авторитетом самого Едісона. Впровадження трифазної системи вимагало великих капіталовкладень для просування на ринок. Співпрацюючі компанії AEG та Oerlikon вирішили використати для цього Всесвітню електротехнічну виставку, організовану в 1891 році у Франкфурті-на-Майні.

Доліво-Добровольський запропонував пред-

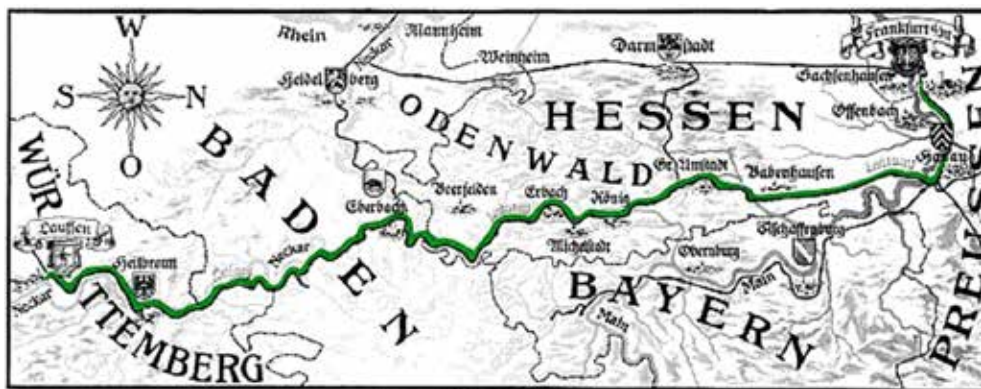
ставити на цій виставці цілісну систему трифазного струму, що складається з генератора, високовольтної лінії електропередачі, трансформаторів, двигуна та звичайних 50-ватних електричних ламп, які можна використовувати в побуті, з демонстрацією її універсальних можливостей. Відповідно до ідеї головного організатора всього проекту Оскара фон Міллера (рис. 7, а), був прийнятий сміливий проект, який передбачав використання повільно працюючої водяної турбіни як приводу генератора, розташованого у місті Лауффен, за 175 км від Франкфурта



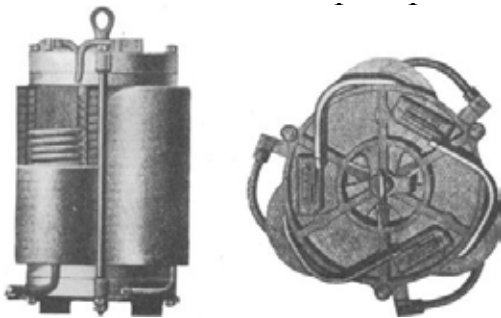
а – Оскар фон Мюллер (1855–1934)



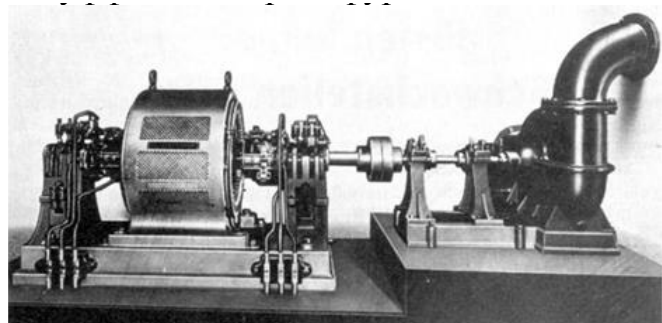
б – Трифазний генератор на ГЕС Лауффен, 1891 р. (P = 230 кВт, n = 150 об/хв, U = 95 В)



в – Лінія електропередачі від Лауффена до Франкфурта-на-Майні



г – Вигляд обмоток трифазного масляного трансформатора AEG 1891 року



д – Трифазний двигун М. Доліво-Добровольського 1891 року

Рис. 7. Побудова лінії електропередачі Лауффен – Франкфурт-на-Майні

(рис. 7. б). Для передачі потужності трифазного змінного струму 15–30 кВ до виставкової площі було за унікально короткий строк (6 тижнів!) збудовано лінію електропередач (рис. 7, в). Генератор ( $P=230$  кВт,  $n=150$  об/хв,  $U=95$  В) та два трансформатори по 150 кВА були поставлені компанією Oerlikon, рис. 7, г. Фірма AEG поставила трифазний двигун ( $P=73$  кВт), який майже в 10 разів більше, ніж ті, що були побудовані на той час (рис. 7, д). Для прокладки лінії було побудовано 3282 опори. Пробний запуск відбувся 12 серпня 1891 р., а офіційний – 25 серпня 1891 р. ( $\eta = 75\%$ ).

Прихильність М. Доліво-Добровольського до її реалізації, а також сила волі та характер винахідника свідчать про надзвичайно ризикований спосіб, яким він переконав комісію, відповідальну за прийняття рішення про запуск цієї лінії. На очах у членів цієї комісії він підняв (навмисно) відключений провід цієї лінії від землі, продемонструвавши тим самим відсутність будь-якої небезпеки, що було не так очевидно, але комісія була переконана.

Виставкова презентація електроенергетичної системи виявилася вдалою. Електрика, що надсилалася здалеку, «рухала» двигун, що приводив у рух водяний насос 10-метрового водоспаду, каскад якого прекрасно виблискував у світлі 1000 електричних лампочок, встановлених на виставці. Всю систему передачі оцінила комісія, яка протягом кількох днів провела точні виміри.

Результати підтвердили рентабельність використання представленої трифазної системи змінного струму. Повідомлення репортерів та кореспондентів преси того часу були приголомшливими, а коментарі викликали захоплення.

Одночасно з виставкою у Франкфурті проходив Міжнародний електротехнічний конгрес. У ньому взяли участь 750 осіб. Під час другого пленарного засідання учасники конгресу (включаючи видатних науковців) мали дуже довгу, іноді бурхливу дискусію щодо терміну "Drehstrom" (трифазний струм) Михайла Доліво-Добровольського. Незважаючи на відсутність одностайності, цей термін кілька разів використовувався в офіційних матеріалах після конгресу.

Після виставки у Франкфурті було визначено напрямок розвитку електротехніки та енергетики. За короткий час було припинено не тільки будівництво електростанцій з генераторами постійного струму, а й з одно- та двофазними машинами змінного струму. Будівництво нових електростанцій розпочалося дуже швидко і виключно в системі трифазного струму. Через шість років

після успіху у Франкфурті AEG запускає перші "трифазні" теплові електростанції – у Забже та Хожуві (Польща). У Росії перше застосування трифазної системи відбулося при електрифікації ліфта в Новоросійську, для чого під керівництвом інж. А. Н. Щенсновича електростанція була побудована у складі з 4 синхронних машин 300 кВА концерну ВВС.

Добровольський починає проектувати наступне покоління трифазних двигунів та трансформаторів і отримує на них подальші патенти. Він також розробляє нові типи трифазних генераторів струму та вимірювальних приладів, у т.ч. фазометр і частотомір. Він також займається питаннями електричної дуги, розробляючи так звані камери гасіння дуги у високовольтних вимикачах. Запатентований ним метод гасіння електричної дуги в розподільних пристроях мав велике практичне значення і, подібно до введеної ним концепції коефіцієнта потужності  $\cos \phi$ , залишається чинним донині.

У 1894-1895 роках він проводив дослідження над потужними генераторами, які могли бути використані на гідроелектростанціях. Це питання було детально проаналізовано під час будівництва (1898) першої у світі трифазної гідроелектростанції в Райнфельдені на швейцарсько-німецькому кордоні. Доліво-Добровольський ознайомився з генератором, спроектованим Брауном для гідроелектростанції в Лаффені, і критично інтерпретував отримані результати. Він виявив, серед іншого, що генератор мав занадто високу дисперсію магнітного поля і малий магнітний потік, що призводило до значного падіння напруги під час навантаження генератора.

Доліво-Добровольський представив результати своїх міркувань щодо генератора для спроектованої гідроелектростанції в Райнфельдені у статті під назвою "Stadium der Bauart der Drehstrom-Generatoren", включеної до журналу "Elektrotechnische Zeitschrift" у 1894 році. У своїй концепції він запропонував нові технічні параметри, особливо з точки зору побудови водяних турбін та їх мінімальної швидкості обертання. У висновках свого аналізу він зробив зауваження щодо необхідності усунення комутатора, що спростило конструкцію та експлуатацію, а також дозволило перенести обмотку на нерухомий статор. Це рішення також дозволило спростити з'єднання з приводним двигуном (наприклад, водяною турбіною) і стало прототипом конструкцій, що використовуються на більшості європейських електростанцій.

Приблизно у той же час М. Доліво-Добровольському було запропоновано зайняти посаду декана новоствореного в Росії електротехнічного факультету Петербурзького політехнічного інституту. Доліво-Добровольський консультує університет, організує закупівлю обладнання та навіть надає факультету приватну колекцію спеціалізованої літератури. Однак він не бере на себе запропоновану функцію, вибачаючись за погане самопочуття.

Незабаром М. Доліво-Добровольський отримує ще більше визнання та відзнаки. У 1900 році він був відзначений золотою медаллю Всесвітньої виставки в Парижі за досягнення в галузі «трифазної» електротехніки. Його діяльність забезпечила йому обрання до Verband Deutscher Elektrotechniker – VDE (Асоціація німецьких інженерів-електриків). Він працює в трьох комітетах VDE: стандартизації та електричних машин, правил електротехнічної безпеки та магнітного гістерезису.

Імовірно, за станом здоров'я, Добровольський переїхав до Швейцарії в 1903 році. Він також намагається отримати швейцарське громадянство та отримує його у 1905 році. З невідомих нам причин він розлучився у березні 1907 р., а через п'ять місяців одружився в Лозанні повторно на Хедвіг фон Таак-Транкранен, художниці та власниці друкарні в Берліні.

Період багаторічного перебування Михайла Доліво-Добровольського у Швейцарії відносно мало відомий. Ймовірно, він весь час співпрацював з АЕГ, оскільки в 1908 році він обійняв посаду директора Берлінського заводу електричних приладів компанії. Тому він переїжджає до Німеч-

чини, підтримує постійні контакти з Технічним університетом у Дармштадті, який у 1911 році «за видатний внесок у розвиток електротехніки» відзначив його званням доктора «honoris causa» (почесний доктор), рис. 8.

У 1914 році розпочинається Перша світова війна. Перебуваючи в Німеччині, Михайло Доліво-Добровольський відчуває всі неприємності, пов'язані з бідністю у війні. У цей складний період – натхненний старшим колегою, широко шанованим професором Йозефом Епштейном – він пише велику історію створення системи трифазного струму. Ця праця опублікована у 1917 році як “Aus der Geschichte des Drehstromes” у трьох наступних номерах “Elektrotechnische Zeitschrift”, рис. 9.

Перша світова війна закінчилася. 11 листопада 1918 року Польща здобула незалежність. Михайло Доліво-Добровольський надсилає вітальну телеграму до Варшави. У ці дні плутанини, хаосу та невизначеності завтрашнього дня відбувається наукова зустріч VDE (27 листопада 1918 р.), на якій Михайло Доліво-Добровольський читає лекцію про межі використання трифазного струму. В атмосфері гарячої дискусії, яку ведуть люди з безперечним авторитетом, переважають голоси здивування.

Але саме автор статті має право окреслити перспективи постійного струму як ланки для великих трифазних систем. Це бачення здійснилося на початку 1960-х років, коли було створено високовольтні лінії постійного струму, для передачі електроенергії великої потужності на далекі відстані підводними кабелями, а також як вставки постійного струму для зв'язку між собою несинхронізованих електромереж змінного струму, як це передбачав Добровольський у функціонуванні великих енергосистем.

На жаль, стан здоров'я М. Доліво-Добровольського продовжує погіршуватися. Напружена робота посилює серцеві захворювання. 15 березня 1919 року він повертається до міста студентської молодості – Дармштадта. Однак він більше не працює у своєму університеті.

У цей час він переживає епідемію грипу. Тритижневе перебування в університетській клініці в Гейдельберзі не допомогло – він помер 15 жовтня 1919 року. Його могила, поділена з другою дружиною Хедвіг (померла у 1943 році), знаходиться в Дармштадті.



Рис. 8. Почесний доктор Технічного університету у Дармштадті



a

b



в

Рис. 9. Стаття Михайла Доліво-Добровольського у трьох послідовних випусках журналу “Elektrotechnische Zeitschrift”:

a – Heft 26, Berlin, 28. czerwca 1917 r.; б – Heft 27, Berlin, 5. czerwca 1917 r., в – Heft 28, Berlin, 12. czerwca 1917 r.

Ще при житті М. Доліво-Добровольського та після його смерті у наукових колах тривала суперечка про те, хто був фактичним творцем системи трифазного струму. Називались прізвиська інших науковців, пов'язаних із відкриттями та винаходами у цьому напрямку. Ця суперечка була вирішена спеціально призначеною комісією VDE у 1957 році.

Ця комісія чітко визначила фундаментальний внесок і значення творчості Доліво-Добровольського, рис. 10 [1–7]:

«перший – Галілео Ферраріс, італійський електротехнік (1847–1897) – насправді мав у своєму розпорядженні правило (закон), але він відклав його публікацію на 3 роки і не зрозумів практичного змісту ідеї;

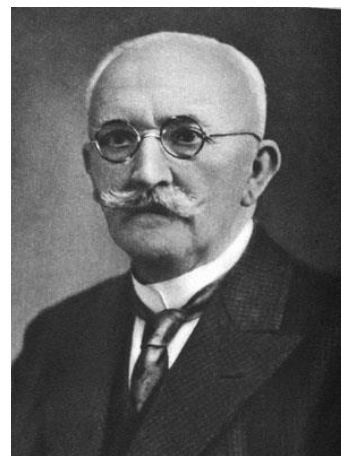
другий – Чарльз Шенк-Бредлі, американський електротехнік (1853–1929) – добре обізнаний у цьому питанні, крок за кроком прийшов до рішення у технічно корисній формі, але обмежився заявкою на патент; він не замислювався про практичну реалізацію цього пристрою;



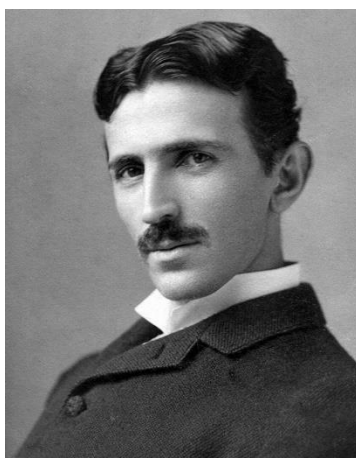
Галілео Ферраріс



Чарльз Ш. Бредлі



Фрідріх А. Газельвандер



Нікола Тесла



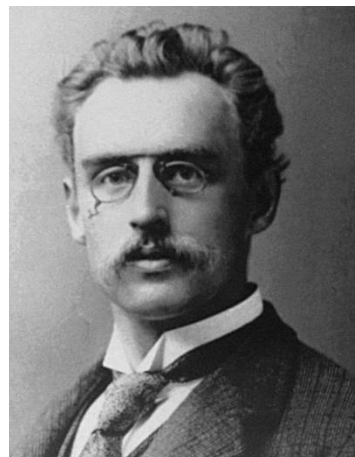
Йонас Венстрем



Михайло О. Доліво-Добровольський



Еміль М. Рагенау



Шарль Е. Л. Браун

**Рис. 10. Творці трифазного струму (за визнанням комісії Verband Deutscher Elektrotechniker у 1957 р.)**

*третій – Фрідріх Август Газельвандер, німецький інженер (1859–1993) – випадково знайшов правильне рішення, правильно визнав його цінність і використав його в невеликих масштабах; однак йому бракувало капіталу та вмілої реклами;*

*четвертий – Нікола Тесла, американський інженер і фізик сербського походження (1856–1943) – подумки розробив рішення проблеми, мріяв про нього децю фантастичними мріями, але не створив технічного рішення;*

*п'ятий – Йонас Венстрем (1855–1893), шведський інженер і винахідник – правильно побачив проблему, знайшов продумані рішення, але записався на 2 роки;*

*шостий – Михайло Осипович Доліво-Добровольський (1862–1919), поляк, уродженець Російської імперії, німецький інженер, електрик і винахідник – добре знав проблеми передачі енергії та конструкції електричних машин, але найбільше йому пощастило працювати під керівництвом блискучого менеджера Еміля Моріца Ратенау (1838–1915), який міг зазирнути далеко в майбутнє;*

*сьомий – Шарль Ежен Ланселот Браун (1863–1924), швейцарський інженер – сприяв вирішенню труднощів, пов'язаних з технікою високої напруги при передачі енергії».*

Після смерті М. Доліво-Добровольського журнал "Elektrotechnische Zeitschrift" опублікував великі мемуари, в яких він характеризується як чутлива, життєрадісна, безпосередня, відкрита людина, добра не тільки до своїх рідних, з видатним інтелектом, яка в дискусіях виявляла глибокі знання технічних питань, але також вражала знаннями світової літератури та мистецтва.

Було підкреслено його особисту культуру та сердечне ставлення до всіх людей, яких він зустрічав.

#### Висновки

Історія життя та діяльності Михайла Доліво-Добровольського є прекрасною ілюстрацією важливого етапу в історії електротехніки, а саме, етапу створення і широкого впровадження трифазного струму. Вивчення його життя показує, як творча особистість може впливати на напрями розвитку науки і техніки, а отже, на якість і рівень суспільного життя. Для цього потрібні певні умови, до

яких, насамперед, належать соціальні потреби в конкретних товарах і послугах, творчі люди – керівники дослідницьких та впроваджувальних груп, а також менеджери, які мають бачення та сміливість забезпечити належне фінансування досліджень та їх впровадження.

Зазначимо, що широке вшанування наукових здобутків Михайла Доліво-Добровольського та суспільна оцінка їх значення для технічного прогресу почалась за ініціативи Товариства електриків Польщі (Stowarzyszenie Elektryków Polskich, SEP). Так, 5-та Міжнародна конференція з нетрадиційних електромеханічних та електричних систем (UEES'01), організована Електротехнічним інститутом Щецинського університету у 2001 році, була присвячена 110-річчя першої у світі передачі електроенергії на великі відстані з використанням високовольтного трифазного струму. На початку конференції було проведено семінар про життя та творчість Михайла Доліво-Добровольського. Важливою подією конференції стало встановлення у Щецині пам'ятного каменя як місця майбутнього пам'ятника Михайлу Доліво-Добровольському, рис. 11, а. Тоді ж на прохання SEP міська рада Щецина вирішила назвати одну з площ біля Електротехнічного інституту іменем Доліво-Добровольського.

У червні 2022 року у рамках Міжнародного дня електрика за ініціативою SEP у Щецині було відкрито пам'ятник-лаву М. Доліво-Добровольському у сквері, який носить ім'я цього видатного електротехніка (рис. 11, б).

У 2007 році SEP започаткувала пам'ятну медаль «Михайло Доліво-Добровольський», якою нагороджуються польські та зарубіжні науковці, що внесли суттєвий внесок у розвиток сучасної електротехніки (рис. 12).



а



б

Рис. 11. Пам'ятні знаки на честь Михайла Доліво-Добровольського



Рис. 12. Перша пам'ятна медаль  
«Михайло Доліво-Добровольський»

Таким чином, Польща вперше вкрай гідно вшанувала цього великого інженера, науковця та винахідника польського походження.

Сучасні дослідники історії електротехніки свідчать, що Доліво-Добровольський – символ європейської електротехніки, так само як і Едісон – американської. Він зіграв видатну роль в історії світової електротехніки. Він зробив фундаментальний внесок у вирішення найважливішої енергетичної проблеми на рубежі 19–20 століть.

Українським електротехнікам та історикам техніки також слід пишатися тим, що цей видатний електрик світового рівня свої перші кроки як дослідник зробив в Україні, коли ще зовсім юним зацікавився природничими науками та активно експериментував з хімічними речовинами.

#### Список літератури:

1. Феррарис, Галилео. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Феррарис,\\_Галилео](https://ru.wikipedia.org/wiki/Феррарис,_Галилео)
2. Charles Schenk Bradley. [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Charles\\_Schenk\\_Bradley.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Charles_Schenk_Bradley.jpg)
3. Friedrich August Haselwander. [https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich\\_August\\_Haselwander](https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich_August_Haselwander)
4. Н. Тесла. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Тесла,\\_Никола](https://ru.wikipedia.org/wiki/Тесла,_Никола)
5. Jonas Wenström. [https://en.wikipedia.org/wiki/Jonas\\_Wenstr%C3%B6m](https://en.wikipedia.org/wiki/Jonas_Wenstr%C3%B6m)
6. Emil Rathenau. [https://en.wikipedia.org/wiki/Emil\\_Rathenau](https://en.wikipedia.org/wiki/Emil_Rathenau)
7. Charles E. L. Brown. [https://en.wikipedia.org/wiki/Charles\\_Eugene\\_Lancelot\\_Brown](https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Eugene_Lancelot_Brown)

#### Szymczak P., Blintsov V.S., Boyko A.O., Burunina Zh.Yu. MYKHAYLO DOLIVO-DOBROVOLSKY: WORLDWIDE PERSONALITY (to the 160th anniversary of the scientist's birth and the 130th anniversary of the first transmission of electricity by three-phase current)

*The main stages of life and professional development of the outstanding engineer and scientist, inventor of three-phase current Mykhailo Dolivo-Dobrovolsky are described. Information provided by his parents, little-known to the Ukrainian reader facts from his childhood and adolescence. Information on education in Odessa and Riga, on the first attempts to carry out student applied research and their recognition is given. Information on Mikhail Dolivo-Dobrovolsky's electrical engineering education and the first stage of his professional activity as a lecturer at Darmstadt University of Technology is presented in more detail.*

*The role of the leading professor Erasmus Kittler in the formation of a young electrician is shown.*

*The main stages of life and professional development of the outstanding engineer and scientist, inventor of three-phase current Mykhailo Dolivo-Dobrovolsky are described. Information about his parents, little-known to the Ukrainian reader facts from his childhood and adolescence are provided. Details on education in Odessa and Riga, on the first attempts to carry out student applied research and their recognition are given. Information on Mikhail Dolivo-Dobrovolsky's electrical engineering education and the first stage of his professional activity as a lecturer at Darmstadt University of Technology is presented in more detail. The role of the leading professor Erasmus Kittler in the formation of a young electrical engineer is shown.*

*Reference on Mykhailo Dolivo-Dobrovolsky's work in the newly created German company Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG) is given. Briefly described his creative activity on design of easy-to-use, cheap in production and operation three-phase asynchronous motor with protein cell. Information on the creation of a three-phase current system to power a three-phase asynchronous motor is provided. Details of the design and construction of three-phase transformers, which allowed the transmission of electricity over long distances is given.*

*The contribution of Mykhailo Dolivo-Dobrovolsky to the implementation of a unique experiment – the world's first transmission of three-phase electric energy over a distance of 175 kilometers – is presented. Brief description on the design of a synchronous generator as a source of electrical energy, which is driven by a hydraulic turbine. The construction of the world's first high-voltage power line, which provided electricity to the World Electrotechnical Exhibition, organized in 1891 in Frankfurt am Main is shown.*

*About the development by Mikhail Dolivo-Dobrovolsky of a number of new types of three-phase motors and transformers, as well as measuring instruments are concisely described.*



*The main scientific publications of Mykhailo Dolivo-Dobrovolsky and on his professional evaluations of projects of hydroelectric power plants of three-phase current of that time are covered. Information about engineers, scientists and managers – creators of three-phase current of those times is given. Brief information about the personal life of an outstanding electrician is given.*

*Measures to honor the memory of the great engineer, scientist and inventor of Polish origin are described.*

**Key words:** *three-phase current, asynchronous electric machine, electric energy transmission.*

## Відомості про авторів

**Абашина А.А.** – магістрантка групи КН-21М кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету

**Антонюк М.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри медико-профілактичних дисциплін та лабораторної діагностики КЗВО «Рівненська медична академія»

**Бажай-Жежерун С.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології оздоровчих продуктів Національного університету харчових технологій

**Баран Н.М.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»

**Барилко С.В.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Батюк С.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Башта А.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології оздоровчих продуктів Національного університету харчових технологій

**Безродний М.К.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бережний Б.-В.В.** – студент 1 курсу магістерського рівня навчання групи ХТМ-11 кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»

**Бернацький А.В.** – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Блінцов В.С.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та електрообладнання Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Бодак Є.Є.** – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бойко А.О.** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська політехніка»

**Бондарєва В.І.** – заступник завідувача відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Босий М.В.** – викладач кафедри матеріалознавства таливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

**Буджеліда А.Н.** – магістрант кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

**Бурик М.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Буруніна Ж.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Васалатій Н.В.** – кандидат географічних наук, доцент кафедри навігації і керування судном Одеського національного морського університету

**Ващенко Ю.М.** – доктор технічних наук, професор кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Вдовичин Т.Я.** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри інформатики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

**Войцехович В.С.** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук України

**Волощук В.А.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гарист А.В.** – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Гнатчук Є.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

**Говорущенко Т.О.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

**Голуб Л.С.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Гриценко О.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»

**Грудініна Г.С.** – викладач кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Грушевська Т.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Управління комерційною діяльністю залізниць» Державного університету інфраструктури та технологій

**Гуйда О.Г.** – кандидат наук з державного управління, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Данилейко О.О.** – інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високвольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України; інженер I категорії кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Деревягіна Н.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

**Дістанов В.Б.** – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Добрязк Д.О.** – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Дулєбова Л.** – доктор філософії, доцент кафедри технологій, матеріалів та автоматизованого виробництва Технічного університету Кошице (Словаччина)

**Душейко М.Г.** – провідний інженер кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сфімова В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Жданюк Н.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімічної технології кераміки та скла Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Жученко Л.К.** – аспірантка, асистент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Загриценко А.М.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

**Здоренко В.Г.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Зіноватна С.Л.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

**Іллїна О.О.** – асистент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Інкін О.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

**Кадочкіна В.В.** – магістрант кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Каменева Н.В.** – доктор сільськогосподарських наук, доцент, Одеський національний технологічний університет

**Кирпіченкова О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри готельно-ресторанної справи Національного університету харчових технологій

**Кисельов В.Б.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Ківа І.Л.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Кобилянська О.О.** – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Коваль В.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Коверніченко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет

**Кондратець В.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

**Корнило І.М.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри організації будівництва та охорони праці Одеської державної академії будівництва та архітектури

**Коротинський А.П.** – асистент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Корякін К.С.** – старший викладач кафедри судноводіння і морська безпека Одеського національного морського університету

**Кошарний О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

**Кравченко Н.В.** – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Кузьменко Т.М.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Куляс Р.О.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Купін А.І.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Комп'ютерні системи та мережі» Криворізького національного університету

**Лазурчак Л.В.** – старший викладач кафедри інформатики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

**Лакида М.О.** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри лісівництва Національного університету біоресурсів і природокористування України

**Лановий О.Т.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

**Лебедев Д.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лещенко П.В.** – студентка III курсу групи ХМ-01 кафедри кафедри хімічної технології кераміки та скла Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лисенко О.І.** – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Литвинець Л.Ф.** – старший викладач кафедри готельно-ресторанної справи Національного університету харчових технологій

**Ліневич Я.О.** – аспірант кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лісовець С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Лободзинський В.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ловська А.О.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

**Лукашенко В.А.** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Луценко Ю.В.** – кандидат технічних наук, начальник сектору Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Лядишев Д.К.** – студент 1-го курсу магістратури групи ТА-11мп кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Маноли Т.А.** – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний технологічний університет

**Мацуй А.М.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

**Мелешко Є.В.** – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету

**Мельник О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морська безпека Одеського національного морського університету, капітан далекого плавання

**Медведєва Н.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організація авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

**Мироненко Л.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри біотехнології, біофізики та аналітичної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Мішко П.І.** – магістрант кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Мовчан К.О.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Набок Т.М.** – молодший науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Надточий А.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики та електрообладнання Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Новак Д.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон Київського національного університету технологій та дизайну

**Новіков В.І.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Олійник Ю.С.** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

**Онищенко О.А.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету «Одеська морська академія»

**Осадчук М.В.** – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Осадчук Ю.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи у промисловості та транспорті» Криворізького національного університету

**Пилипенко Т.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пінаєв Б.О.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Погребова І.С.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Попович П.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету

- Поповичук Т.О.** – магістр Державного університету інфраструктури та технологій
- Присяжнюк В.В.** – начальник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
- Припула Н.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Пуляєв І.О.** – старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету
- Рудаков Д.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
- Савицький О.І.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизації, комп'ютерних наук та технологій» Криворізького національного університету
- Савченко О.В.** – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
- Садовенко І.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
- Сазонов А.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Свірський В.В.** – молодший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
- Семенов А.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету
- Семенова О.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету
- Семичасвський С.В.** – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
- Сізий Б.С.** – курсант Відокремленого структурного підрозділу «Криворізький фаховий коледж Національного авіаційного університету»
- Сіора О.В.** – науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України
- Сірий О.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Слободянюк М.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри корабельної енергетики та електроенергетичних систем Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»
- Соколовський М.В.** – інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України
- Спінул Л.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Стрелко О.Г.** – доктор історичних наук, професор, декан факультету «Управління залізничним транспортом» Державного університету інфраструктури та технологій
- Сушин І.О.** – аспірант кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Тараненко О.Г.** – кандидат сільськогосподарських, доцент, Одеський національний технологічний університет
- Тимошук В.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
- Тішакін М.В.** – магістрант кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

**Ткаченко О.Б.** – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний технологічний університет  
**Топчій Н.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Торопов Б.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Управління комерційною діяльністю залізниць» Державного університету інфраструктури та технологій

**Усов А.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики та моделювання систем Національного університету «Одеська політехніка»

**Фалович В.А.** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри промислового маркетингу Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

**Фалович Н.М.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету

**Фомін О.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

**Хлопенко І.М.** – аспірант PhD Херсонської державної морської академії

**Цимбалістий С.З.** – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Чередниченко В.І.** – студент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Черепанська І.Ю.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Чибеліс В.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Чичуліна К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри економіки, підприємництва та маркетингу Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Чорна О.В.** – кандидат економічних наук, старший викладач кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету

**Чумаченко С.М.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій

**Шамсутдінова Н.О.** – інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Шевчук О.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету

**Шерстньов Ю.В.** – аспірант кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи у промисловості та транспорті» Криворізького національного університету

**Пьотр Шимчак** – D-r Eng., Президент Асоціації електриків Польщі (SEP), Польща

**Шишкіна О.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій Криворізького національного університету

**Школьнікова Т.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Шорнікова С.В.** – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Шпильовий О.О.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Щенявський Г.С.** – викладач кафедри судноводіння і морська безпека Одеського національного морського університету

**Явіся В.С.** – кандидат технічних наук, доцент, заступник завідувача кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Якіменко М.Л.** – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Янцевич К.В.** – молодший науковий співробітник відділу «Захисних покриттів» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 33 (72) № 4 2022**

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Ю. Семенченко*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 32,02. Ум. друк. арк. 41,62. Зам. № 0722/292

Підписано до друку 01.08.2022. 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](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.