

**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 34 (73) № 3 2023**

**Частина 2**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2023

## 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 геоінженерії 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 № 11 від 10.07.2023 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, 2023

## ЗМІСТ

### ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

Максимов І.І., Слободянюк В.К., Максимова І.І.

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ТОЧКИ ФЕРМА-ТОРРІЧЕЛЛІ  
ТА МІНІМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОЇ РОБОТИ ..... 1

### ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Бернацький А.В., Сіора О.В., Кагляк О.Д., Шамсутдінова Н.О., Данилейко О.О.

СТВОРЕННЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА СИСТЕМИ ПОШУКУ МІСЦЯ ЗНАХОДЖЕННЯ  
ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ..... 8

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Павленко В.Я.

ІНДИКАТОРНИЙ ІНСТРУМЕНТ ЯК ЗАПОРУКА ЯКОСТІ В ПРАКТИЦІ ТЕХНІЧНОГО  
КОНТРОЛЮ: МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ.....13

### АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Rahulin S.V., Sharabaiko A.N., Lozovskyi V.G.

OPTIMIZATION OF AIRCRAFT BEARING SURFACE BASED ON THE SOLUTION  
OF COUPLED EQUATIONS.....19

### ЕНЕРГЕТИКА

Бетін Ю.О., Абдулін М.З.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТОПКОВИХ ПРОЦЕСІВ  
У НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕЧАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ..... 25

Боянівський В.П.

ТЕПЛООБМІН ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ВСЕРЕДИНИ  
ГОРИЗОНТАЛЬНО-ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИКІВ ІЗ ГЛАДКИМИ ТРУБАМИ..... 31

Волощук В.А., Некрашевич О.В., Богза М.С., Гікало П.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ  
ТИПУ «ПОВІТРЯ-ВОДА»..... 36

Volchyn I.A., Provalov O.Yu., Mokretskyy V.O.

EFFECT OF CATALYTIC FUEL ADDITIVE ON THE EFFICIENCY OF A GAS STEAM BOILER.....45

Климась Р.В., Ніжник В.В., Несенюк Л.П., Серeda Д.В.

ДО ПИТАНЬ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ  
ПРИПИНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ СИСТЕМОЮ ВОГНЕПЕРЕШКОДЖАННЯ  
НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ.....52

Слободянюк М.В., Нікольський В.В., Нікольський М.В.

ОЦІНКА МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА  
СУДНОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ.....58

Чорна В.О., Мельник О.Є.

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЦИВІЛЬНОЇ БУДІВЛІ..... 65

### ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Обушенко Т.І.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФЛОТОЕКСТРАКЦІЙНОГО ВИДАЛЕННЯ ІОНІВ ЦИНКУ  
З РОЗЧИНІВ.....71

Пилипенко І.В.

ГРАНУЛЬОВАНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ЛАПОНІТУ ТА АЛЬГІНАТУ НАТРІЮ  
ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ МЕТИЛЕНОВОГО БЛАКИТНОГО З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ.....77

<b>Пилипенко О.І., Смірнов О.О., Зайцева І.С., Панайотова Т.Д.</b> ПОВЕДІНКА ТИТАНУ VT1-0 В УМОВАХ АНОДНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ У СИСТЕМІ «ЕТИЛЕНГЛІКОЛЬ – ВОДА – HF – NH <sub>4</sub> F».....	85
<b>Пилипенко Т.М., Єфімова В.Г., Санжаровська В.В., Качоровська О.П.</b> РОЗРОБКА СКЛАДУ ЗАСОБУ ПО ДОГЛЯДУ ЗА ШКІРОЮ ГОЛОВИ ТА ВОЛОССЯМ НА ОСНОВІ ПОЛІФЕНОЛЬНОЇ РЕЧОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ.....	90
<b>Спасьонова Л.М.</b> СТВОРЕННЯ ЯКІСНОЇ КЕРАМІКИ З МІСЦЕВОЇ ЛЕГКОПЛАВКОЇ СИРОВИНИ З ВИСОКОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДО СУШІННЯ.....	94
<b>Фроленкова С.В.</b> ФОРМУВАННЯ КОНВЕРСИЙНИХ МОЛБДАТНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ З МЕТОЮ ЇЇ ЗАХИСТУ ВІД АТМОСФЕРНОЇ КОРОЗІЇ. Ч. 1. УТВОРЕННЯ НА СТАЛІ ПЛІВОК З ОКСИДУ МОЛБДЕНУ (IV) ШЛЯХОМ ВІДНОВЛЕННЯ МОЛБДАТІВ.....	100
<b>ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ</b>	
<b>Петраченко Д.О., Дудукова С.В.</b> ОГЛЯД ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ З ТОЧКИ ЗОРУ ПЕРЕРОБКИ.....	105
<b>Святненко Р.С., Маринін А.І., Шевченко О.Ю., Позняк О.М., Літвинчук С.І.</b> ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА ОРГАНОЛЕПТИЧНІ ПОКАЗНИКИ МЕДУ РІЗНОГО БОТАНІЧНОГО ТА ОДНОГО РЕГІОНАЛЬНОГО ПОХОДЖЕННЯ.....	110
<b>ТРАНСПОРТ</b>	
<b>Аринушкіна Н.С., Грищенко Т.М.</b> ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ УКРАЇНИ.....	115
<b>Ватуля Г.Л., Ловська А.О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ОБШИВКИ ДАХУ ВАГОНА-ХОПЕРА ІЗ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ.....	120
<b>Doshchenko H.H., Nahovskyi D.A.</b> MATHEMATICAL MODEL OF STEADY OPERATION OF SHIP ELECTRICAL COMPLEXES.....	125
<b>Козенок А.С.</b> МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДОЦІЛЬНОСТІ СТВОРЕННЯ ТРАНСКОРДОННИХ ТЕРМІНАЛІВ НА ЗАХОДІ УКРАЇНИ ПРИ ЕКСПОРТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВАНТАЖІВ.....	130
<b>Колодницька Р.В.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ.....	136
<b>Мельник О.М.</b> АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ТА МАНЕВРУВАННЯ СУДНА НА БЕЗПЕКУ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	143
<b>Торопов Б.І., Стрелко О.Г., Грушевська Т.М., Васілова Г.С., Лигун Ю.Ю.</b> ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ І ТЕХНІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ВУЗЛІВ.....	150
<b>Трюхан О.М.</b> ПОЛЬОТИ В УМОВАХ АТМОСФЕРНОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ.....	157
<b>БУДІВНИЦТВО</b>	
<b>Кайдаш М.Д.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СКЛАДНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ У КОНТЕКСТІ АНАЛІЗУ Й СИНТЕЗУ РІЗНИХ ТИПІВ МЕХАНІЗМІВ.....	162
<b>Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Осадчук М.В., Якіменко М.Л.</b> ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ВИПРОБУВАНЬ РУЧНИХ ПОЖЕЖНИХ ДРАБИН.....	171
<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....</b>	175

## CONTENTS

### APPLIED GEOMETRY, ENGINEERING GRAPHICS AND ERGONOMICS

**Maksymov I.I., Slobodyanyuk V.K., Maksymova I.I.**

ANALYTICAL DETERMINATION OF FERMAT-TORRICELLI POINT COORDINATES  
AND MINIMIZATION OF TRANSPORT WORK..... 1

### MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

**Bernatskyi A.V., Siora O.V., Kaglyak O.D., Shamsutdinova N.O., Danyleiko O.O.**

CREATING A PROTOTYPE SAMPLE OF A SYSTEM FOR SEARCHING THE LOCATION  
OF A WELDED JOINT FOR LASER WELDING..... 8

### INDUSTRIAL ENGINEERING

**Pavlenko V.Ya.**

INDICATION TOOL AS A GUARANTEE OF QUALITY IN THE PRACTICE  
OF TECHNICAL CONTROL. METHODS AND MEANS OF MEASUREMENTS.....13

### AVIATION AND ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

**Rahulin S.V., Sharabaiko A.N., Lozovskyi V.G.**

OPTIMIZATION OF AIRCRAFT BEARING SURFACE BASED ON THE SOLUTION  
OF COUPLED EQUATIONS.....19

### POWER ENGINEERING

**Bietin Yu.O., Abdulin M.Z.**

STUDYING THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY  
OF ORGANIZING FURNACE PROCESSES IN LOW-TEMPERATURE  
LOW-CAPACITY FURNACES.....25

**Boianivskyi V.P.**

HEAT TRANSFER DURING WATER STEAM CONDENSATION INSIDE HORIZONTAL FILM  
EVAPORATORS WITH SMOOTH TUBES..... 31

**Voloshchuk V.A., Nekrashevych O.V., Bohza M.S., Hikalo P.V.**

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN AIR-SOURCE HEAT-PUMP SYSTEM..... 36

**Volchyn I.A., Provalov O.Yu., Mokretskyy V.O.**

EFFECT OF CATALYTIC FUEL ADDITIVE ON THE EFFICIENCY OF A GAS STEAM BOILER.....45

**Klymas R.V., Nizhnyk V.V., Nesenjuk L.P., Sereda D.V.**

ON THE ISSUES OF THE ECONOMIC EFFECT DURING THE IMPLEMENTATION  
OF THE METHOD FOR PREDICTING THE STOPPING AND SPREAD OF THE FIRE  
PREVENTION SYSTEM AT OIL-FILLED TRANSFORMER SUBSTATIONS.....52

**Slobodianiuk M.V., Nikolskyi V.V., Nikolskyi M.V.**

ASSESSMENT OF THE MODEL OF HYDRODYNAMIC PROCESSES OF FUEL INJECTION  
OF MEDIUM SPEED MARINE DIESEL..... 58

**Chorna V.O., Melnik O.Ye.**

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR ADJUSTING THE PARAMETERS  
OF BODY SUPPLY AND ELECTRICAL SUPPLY OF A CIVIL BUILDING.....65

### CHEMICAL TECHNOLOGY

**Obushenko T.I.**

STUDY OF THE PARAMETERS OF ZINC IONS REMOVAL WITH SOLVENT SUBLATION PROCESS.....71

**Pylypenko I.V.**

GRANULAR COMPOSITES BASED ON LAPONITE AND SODIUM ALGINATE  
FOR REMOVAL OF METHYLENE BLUE FROM AQUEOUS SOLUTIONS.....77

<b>Pylypenko O.I., Smirnov O.O., Zaitseva I.S., Panayotova T.D.</b> THE BEHAVIOR OF TITANIUM VT1-0 IN THE CONDITIONS OF ANODE POLARIZATION IN THE “ETHYLENE GLYCOL – WATER – HF – NH <sub>4</sub> F” SYSTEM.....	85
<b>Pylypenko T.M., Yefimova V.G., Sanzharovska V.V., Kachorovska O.P.</b> COMPOSITION DEVELOPMENT OF THE MEANS FOR SCALP AND HAIR CARE ON THE BASIS OF A PLANT ORIGIN POLYPHENOLIC SUBSTANCE.....	90
<b>Spasonova L.M.</b> CREATION OF QUALITY CERAMICS FROM LOCAL MELTING RAW MATERIALS WITH HIGH SENSITIVITY TO DRYING.....	94
<b>Frolenkova S.V.</b> FORMATION OF CONVERSION MOLYBDATE COATINGS ON STEEL FOR PROTECTION FROM ATMOSPHERIC CORROSION. PART 1. MOLYBDENUM (IV) OXIDE FILMS FORMATION ON STEEL BY REDUCTION OF MOLYBDATE.....	100

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

<b>Petrachenko D.O., Dudukova S.V.</b> REVIEW OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL HEMP SEEDS IN TERMS OF PROCESSING.....	105
<b>Svyatnenko R.S., Marynin A.I., Shevchenko O.Yu., Poznyak O.M., Litvynchuk S.I.</b> PHYSICO-CHEMICAL AND ORGANOLEPTIC INDICATORS OF HONEY FROM DIFFERENT BOTANICAL AND ONE REGIONAL ORIGIN.....	110

## **TRANSPORT**

<b>Arinushkina N.S., Hryshchenko T.M.</b> THE TRAFFIC SAFETY IMPROVEMENT ON THE ROADS OF UKRAINE.....	115
<b>Vatulia G.L., Lovska A.O.</b> RESEARCH OF THE STRENGTH OF THE ROOF COVERING OF A HOPPER WAGON MADE OF COMPOSITE MATERIAL.....	120
<b>Doshchenko H.H., Nahovskyi D.A.</b> MATHEMATICAL MODEL OF STEADY OPERATION OF SHIP ELECTRICAL COMPLEXES.....	125
<b>Kozenok A.S.</b> METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FEASIBILITY OF ESTABLISHING CROSS-BORDER TERMINALS IN WESTERN UKRAINE FOR THE EXPORT OF AGRICULTURAL GOODS.....	130
<b>Kolodnytska R.V.</b> FUEL CONSUMPTION MODELLING FOR ALTERNATIVE DIESEL FUELS OF AUTOMOBILE TRANSPORT .....	136
<b>Melnyk O.M.</b> ANALYSIS OF THE SHIP'S MOVEMENT AND MANEUVERING PARAMETERS INFLUENCE ON THE OPERATIONAL SAFETY .....	143
<b>Toropov B.I., Strelko O.H., Hrushevska T.M., Vasilova H.S., Ligun Yu.Yu.</b> APPLICATION OF SYSTEM ANALYSIS FOR IMPROVING TECHNOLOGY AND TECHNICAL EQUIPMENT OF RAILWAY NODES.....	150
<b>Trukhan O.M.</b> FLIGHTS IN CONDITIONS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE .....	157

## **CONSTRUCTION**

<b>Kaidash M.D.</b> RESEARCH OF THE PROPERTIES OF COMPLEX MECHANICAL SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF DIFFERENT TYPES OF MECHANISMS.....	162
<b>Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Osadchuk M.V., Yakimenko M.L.</b> JUSTIFICATION OF TESTING METHODOLOGY OF MANUAL FIRE LADDERS.....	171

<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS.....</b>	175
---------------------------------------	-----

# ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 514.177.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/01>

**Максимов І.І.**

Криворізький національний університет

**Слободянюк В.К.**

Криворізький національний університет

**Максимова І.І.**

Державний університет економіки і технологій

## АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ТОЧКИ ФЕРМА-ТОРРІЧЕЛЛІ ТА МІНІМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОЇ РОБОТИ

*В математиці відома точка Ферма-Торрічеллі, яка забезпечує мінімальну відстань до вершин трикутника. Універсальна аналітична формула визначення координат точки Ферма-Торрічеллі для довільного опуклого багатокутника на теперішній час не знайдена. Але рішення можливо отримати для симетричних багатокутників.*

*Метою даної роботи є розробка методологічної основи для визначення координат точки мінімуму транспортної роботи та дослідження впливу на цю точку розташування вершин багатокутника.*

*У статті надано огляд сучасних досліджень, в яких для мінімізації логістичних процесів застосовуються алгоритми з використанням точки Ферма-Торрічеллі. У роботі використані методи математичної оптимізації та аналітичної геометрії. Методами аналітичної геометрії встановлені формули для визначення координат оптимальної точки зведення для кількості точок  $n=3$  та  $n=4$ .*

*Для потреб багатьох галузей науки та техніки практичне значення має розробка методу, що дозволяє спрогнозувати вплив нерівноважених точок на положення точки, що забезпечує мінімум транспортної роботи. Прикладом такої задачі є пошук оптимального розміщення переробного підприємства, на яке з кількох точок доставляється однаковий (рівнозважені точки) або різний (нерівнозважені точки) обсяг сировини. При цьому мінімізується загальний обсяг транспортної роботи з доставки сировини. Показано, що центр ваги не завжди збігається з точкою Ферма-Торрічеллі, а може бути використаний тільки як попереднє рішення задачі.*

*Для нерівнозважених точок не існує геометричних методів розв'язку. Але запропонований в даній роботі метод дозволяє знайти координати оптимальної точки як для рівнозважених, так і нерівнозважених точок. Крім того, проведено дослідження по зміні об'єму транспортної роботи при відхиленні точки зведення від оптимальної точки Ферма-Торрічеллі, що не можливо зробити геометричними методами. Дослідженнями встановлені умови, при яких одна з нерівнозважених точок буде оптимальною.*

**Ключові слова:** точка Ферма-Торрічеллі, координати оптимальної точки, мінімізація транспортної роботи, нерівнозважені вершини, центр ваги.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Для багатьох галузей науки та техніки практичне значення має розробка методу, що дозволяє спрогнозувати вплив розташування вершин багатокутника на положення внутрішньої точки, що забезпечує мінімум транспортної роботи. Ця проблема виникає при обґрунтуванні оптимального положення перевантажувальних пунктів, при рішенні логістич-

них задач, при розробці економіко-математичних моделей. Аналіз проектних рішень в гірничо-металургійній промисловості свідчить, що положення об'єктів переробного комплексу відносно сировинної бази визначається без достатнього теоретичного обґрунтування [1–4]. В теорії ще немає загального і повного рішення задачі оптимізації положення точки зведення, що забезпечує мінімум транспортної роботи.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Задача оптимізації положення транспортних комунікацій представляє великий інтерес з теоретичної та практичної точок зору і є однією з класичних наукових проблем. Вперше задача визначення оптимальної точки зведення була поставлена П'єром Ферма [5, 6, 10] наступним чином: «для трьох заданих точок знайти четверту, таку, що якщо від неї провести прямі лінії до даних точок, сума відстаней буде найменшою». Розв'язком цієї задачі займалося багато дослідників. Вважається, що вперше рішення цієї задачі для трьох точок дано Е. Торрічеллі і В. Вівіані. Рішення задачі було отримане фізичними методами – оптимальною точкою для трикутника є така точка, з якої всі сторони трикутника видно під кутом  $120^\circ$ . Дана точка називається точкою Ферма-Торрічеллі. Якщо один із кутів трикутника  $ABC$  більше  $120^\circ$ , то відповідна вершина є точкою Ферма-Торрічеллі. В XIX столітті були знайдені та обґрунтовані (Якоб Штейнер) геометричні методи розв'язання цієї задачі [5–9] (рис. 1). Для знаходження точки Ферма-Торрічеллі (точка  $T$ ) на сторонах даного трикутника будують допоміжні правильні трикутники (трикутники Наполеона). Точку  $T$  можна знайти як точку перетину кіл, описаних навколо трикутників Наполеона, або ліній Сімпсона ( $AA'$ ,  $BB'$ ,  $CC'$ ). Для знаходження точки  $T$  достатньо побудувати будь-які дві з зазначених вище ліній. В 1834 р. Ф. Хайнен довів, що довжини цих відрізків дорівнюють сумі відстаней від точки Ферма-Торрічеллі до вершин даного трикутника.

$$AA' = BB' = CC' = TC + TB + TA$$

$$\angle BTC = \angle BTA = \angle CTA = 120^\circ$$

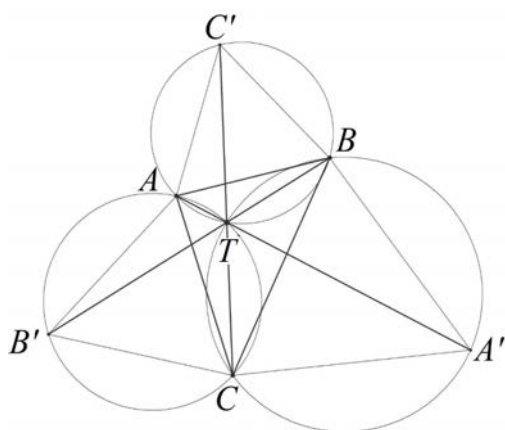


Рис. 1. Геометричне рішення задачі визначення точки Ферма-Торрічеллі для трикутника

В такому вигляді ми маємо геометричну задачу, яку можна розв'язати за допомогою циркуля та

лінійки. Але при розв'язанні багатьох прикладних задач необхідно знаходити координати оптимальної точки Ферма-Торрічеллі.

Для чотирьох точок рішення задачі визначення точки Ферма-Торрічеллі було знайдено італійським інженером і математиком Фаньяно: для опуклого чотирикутника мінімум суми відстаней досягається в точці перетину діагоналей.

Великий внесок у розвиток методу знаходження оптимальних точок зведення вніс Якоб Штейнер (1796–1863) [9]. Для кількості точок, більшої за чотири, він заклав основи створення теорії оптимальних мереж. Їм особисто були розглянуті тільки деякі окремі випадки, а теорії графів і логістики були розвинені в XIX і на початку XX століття (Р.Курант, 1888–1972 рр.) [9].

Для спрощення рішення логістичних задач в якості точки Ферма-Торрічеллі іноді використовують точку центру ваги. Але збіг цих точок можливий для правильних і окремих видів багатокутників. Відомі алгоритми визначають точку Ферма-Торрічеллі геометричними методами. Але практичне значення має розробка методу, що дозволяє знаходити координати оптимальної точки зведення для багатокутника при відомих координатах його вершин з урахуванням вагових коефіцієнтів.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є розробка методологічної основи для аналітичного визначення точки Ферма-Торрічеллі для кількості вершин, що не перевищує чотири.

**Викладення матеріалу та результати.** За допомогою геометричного методу проведемо дослідження закономірностей взаємного розташування точок  $P$  (центр ваги) і  $T$  (точка Ферма-Торрічеллі) при зміні геометрії трикутників (рис. 2).

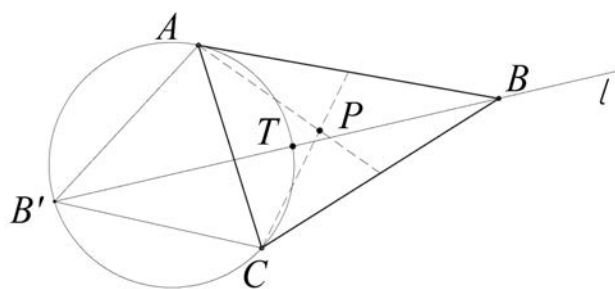


Рис. 2. Особливості взаємного розміщення точок  $T$  (точка Ферма-Торрічеллі) і  $P$  (центр ваги) при зміні геометрії трикутників

Розглянемо довільний трикутник  $ABC$ . На стороні  $AC$  для визначення допоміжної точки  $B'$  побудуємо рівносторонній трикутник  $AB'C$ . Навколо трикутника  $AB'C$  описуємо коло. Відомо, що



точка  $T$  завжди лежить на дузі  $AC$ . На перетині дуги  $AC$  та відрізка  $BB'$  знаходимо шукану точку  $T$ . Центр ваги знаходимо як точку перетину медіан трикутника  $ABC$ . Якщо вершина  $B$  буде віддалятися від сторони  $AC$  уздовж променя  $I$ , то також буде зміщуватися центр ваги трикутника (точка  $P$ ), але положення точки  $T$  залишається незмінним. Таким чином, ми показали, що центр ваги не завжди збігається з точкою Ферма-Торрічеллі, а може бути використаний тільки як попереднє рішення задачі.

Для знаходження координат точки Ферма-Торрічеллі довільного трикутника ще не знайдені зручні формули. Відсутність формул ускладнює виконання досліджень з економіко-математичної оптимізації логістичних схем. Знаходження координат оптимальної точки звозу залишається актуальною задачею [10].

Для рівнобедрених трикутників знайти координати точки Ферма-Торрічеллі можна за рахунок вибору відповідної системи координат (центр системи координат в середині основи, позитивний напрямок осі  $Ox$  вздовж висоти трикутника (рис. 3)).

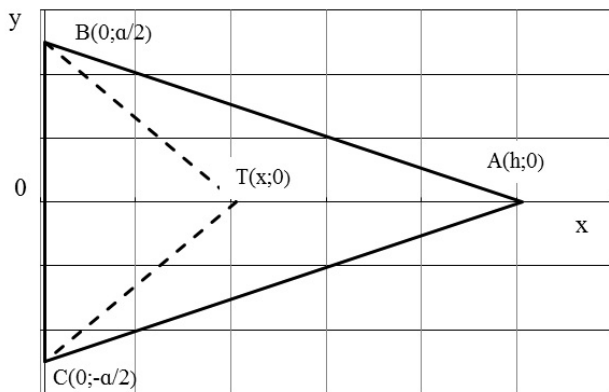


Рис. 3. Схема для визначення координат точки Ферма-Торрічеллі

Основу рівнобедреного трикутника  $CB$  приймемо рівною  $a$ ; а висоту  $OA$  –  $h$ . При такому виборі системи координат точка Ферма-Торрічеллі розташовується на осі  $Ox$  і залишається знайти тільки одну координату. Для довільної точки  $T(x, 0)$  сума відстаней до вершин трикутника дорівнює:

$$F(x) = 2\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}} + (h - x) \quad (1)$$

Прирівнюємо похідну до нуля і знаходимо координати оптимальної точки:

$$x_T = \frac{a\sqrt{3}}{6} \approx 0,289 \cdot a \quad (2)$$

Для рівнобедреного трикутника точка Ферма-Торрічеллі лежить на висоті на відстані  $x = a\sqrt{3}/6$  від середини основи. Ця відстань залежить тільки від величини основи і не залежить від висоти трикутника. Графік функції (1) має асимптоту  $y = x + h$  (рис. 4). Графік побудований для  $h=2a$ . При іншому значенні висоти, графік функції та його асимптота мають однакову форму. Найменша сума відстаней від вершин трикутника дорівнює  $h + a\sqrt{3}/2$  при  $x = a\sqrt{3}/6$ . На проміжку  $x \in [0; 2a/3]$  сума залишається меншою  $h + a$ , а при  $x > 2a/3$  зростає пропорційно збільшенню  $x$  (тангенс кута нахилу дотичної дорівнює одиниці).

Цей метод також можна застосувати для трикутника з нерівнозваженими вершинами. Така задача виникає у випадку пошуку оптимального розміщення переробного підприємства, на яке з трьох точок надходять різні обсяги сировини [8].

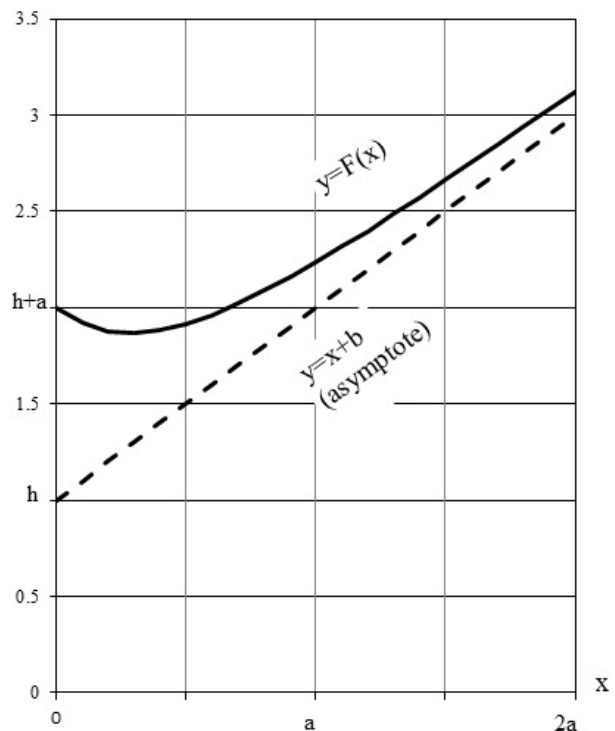


Рис. 4. Зміна суми відстаней до вершин трикутника при віддаленні точки  $T$

Розглянемо випадок, коли з точки  $A$  надходить обсяг сировини  $Q_A = K \cdot Q$ , де  $Q = Q_C = Q_B$  – обсяг сировини, що надходить з точок  $C$  і  $B$ . Необхідно знайти мінімум функції, що визначає загальний обсяг транспортної роботи

$$F(x) = 2\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}} + K(h - x) \quad (3)$$

Прирівнюємо похідну до нуля і знаходимо координату оптимальної точки  $T$

$$X_T = \frac{K \cdot a}{2\sqrt{4 - K^2}} \quad (4)$$

Якщо  $K = 1$ , значення формули (4) співпадає з формулою (3). При  $K > 1$  координата оптимальної точки також не залежить від висоти трикутника. Координата точки  $T$  залежить від основи ( $a$ ) та коефіцієнта перевищення об'єму сировини для вершини  $A$ ,  $K = Q_A/Q$ .

При  $K < 1$ , одержуємо значення  $x_T < a\sqrt{3}/6$ . Наприклад, якщо  $K = 0,5$  з  $x_T = a/2 \cdot \sqrt{15} \approx 0,129 \cdot a$ . При цьому кут  $\angle BTC \approx 151^\circ$  (більше  $120^\circ$ , що відповідає  $K = 1$ ). Якщо  $K > 1$ , то  $x_T > a \cdot \sqrt{3}/6$  ( $\angle BTC < 120^\circ$ ), оптимальна точка  $T$  наближається до вершини  $A$ .

У випадку нерівнозважених точок трикутника геометричні методи знаходження оптимальної точки звозу не працюють. Розв'язати цю задачу можна тільки з використанням фізичної моделі. В деякому масштабі на площині будують трикутник  $ABC$ . В вершинах трикутника роблять отвори, через які пропускають шнури. Кінці шнурів зв'язують, вузол розміщують зверху на поверхні площини. До нижніх кінців шнурів прив'язують ваги, пропорційні обсягам перевезень  $Q_A; Q_B; Q_C$ . Врівноважене положення вузла відповідає розміщенню оптимальної точки звозу. При проходженні вузла в один з отворів, відповідна вершина є оптимальною точкою. Досліди показують, що вершина трикутника буде оптимальною точкою, якщо відповідна вага буде дорівнювати сумі двох інших, в деяких дослідах трохи менше суми двох інших. Але, враховуючи сили тертя та недосконалість моделі, цей висновок можна вважати наближеним (орієнтовним).

З формули (4) слідує, що при  $K \rightarrow 2$ ,  $x \rightarrow \infty$  може стати більшим будь-якого значення  $h$ . Відтак вершина  $A$  може стати оптимальною при  $K$  меншому 2. Підставляємо в формулу (4) значення  $x = h$  і знаходимо  $K$ :

$$K_A = \frac{2 \cdot h}{\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}}} \quad (5)$$

З формули (5) випливає обернена залежність, при  $h \rightarrow \infty$ ;  $K \rightarrow 2$ . Тобто, чим більш віддалена від основи вершина  $A$ , тим більше значення  $K = Q_A/Q$ , при якому ця вершина є оптимальною точкою. При  $h = a \cdot \sqrt{3}/2$  (трикутник рівносторонній)  $K = \sqrt{3} \approx 1,73$ . Вершина  $A$  стає оптимальною при умові, що  $Q_A$  на 73% перевищує  $Q = Q_C = Q_B$ . Якщо  $h = a/2$ , то  $K = \sqrt{2} \approx 1,41$ . При  $h = a \cdot \sqrt{3}/6$  (кут при вершині  $A$  дорівнює  $120^\circ$ )  $K = 1$ . Якщо,  $h = a$ , то  $K = 0,8 \cdot \sqrt{5} \approx 1,79$ ; якщо  $h = 2a$ , то  $K \approx 1,94$  ( $\angle A \approx 28^\circ$ ;  $\angle C = \angle B \approx 76^\circ$ ).

На рис. 4 наочно показаний характер зміни коефіцієнта  $K$  при збільшенні  $h$ .

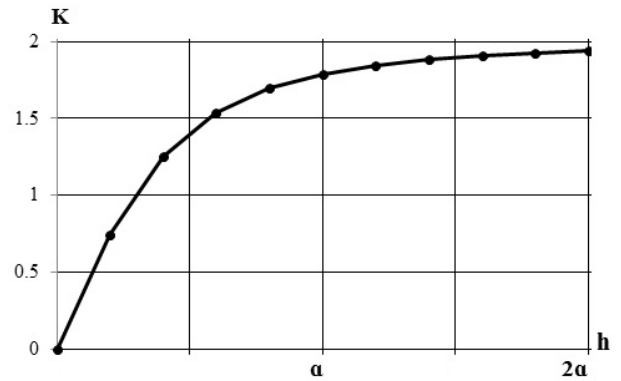


Рис. 5. Зміна коефіцієнта  $K$  при збільшенні висоти рівнобедреного трикутника

На рис. 6 показаний характер зміни сумарної транспортної роботи ( $K=2$ ) для різних точок висоти трикутника.

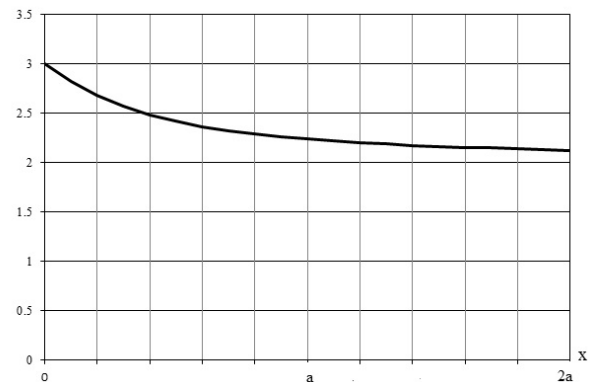


Рис. 6. Зміна сумарного об'єму перевезень при двократному перевищенні  $Q_A = 2Q$

При переміщенні точки звозу з початку координат до вершини  $A$  обсяг перевезень знижується на 30%. Порівняння графіків на рис. 4 та рис. 6 показує, що для нерівнозважених вершин трикутника характер зміни сумарної транспортної роботи радикально змінюється.

З проведених досліджень можна зробити висновок про різні закономірності розміщення оптимальної точки Ферма-Торрічеллі для рівнозважених та нерівнозважених вершин трикутника.

Якщо точки рівнозважені, то координати оптимальної точки  $T$  не змінюються при віддаленні вершини  $A$ . При  $h \geq a \cdot \sqrt{3}/6$  завжди  $X_T = a \cdot \sqrt{3}/6$  ( $\angle A$  менше  $120^\circ$ ). При  $h \leq a \cdot \sqrt{3}/6$  кут при вершині  $A$  стає  $\geq 120^\circ$  і ця вершина є оптимальною точкою  $T$ .

Якщо точки різнозважені, то довільна точка висоти трикутника  $x \in (0; h]$  може бути оптимальною при відповідному значенні  $K = 2x/\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}}$ .

При збільшенні  $K$  від 1 до  $2h/\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}}$  координата оптимальної точки збільшується від  $X_1 = a \cdot \sqrt{3}/6$  до  $X_T = h$  (співпадає з вершиною А).

При  $K \in (0; 1]$ ;  $X_T \in (0; a\sqrt{3}/6)$ . Якщо  $h \leq a \cdot \sqrt{3}/6$ , то кут при вершині А  $\geq 120^\circ$ , але при  $K < 2h/\sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}}$  оптимальною буде не вершина А (як при  $K=1$ ), а внутрішня точка висоти.

Рішення задачі визначення оптимальної точки зведення для чотирьох точок простіше. Оптимальною точкою є точка перетину діагоналей чотирикутника. У справедливості теореми Фаньяно легко переконатись (рис. 7). Візьмемо довільну точку  $S$  всередині чотирикутника. Так як пряма коротше будь-якої ламаної, то сума відстаней від точки  $T$  до вершин чотирикутника буде більше, ніж для точки  $S$ .

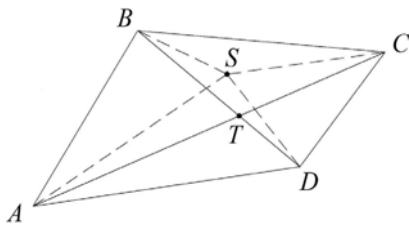


Рис. 7. Визначення точки Ферма-Торрічеллі для чотирикутника

Для більшої кількості точок геометричне рішення задачі визначення оптимальної точки не знайдене. Координати оптимальної точки зводу для чотирьох точок можна знайти як координати точки перетину діагоналей (рис. 8).

Знайдемо координати точки  $T$  при відомих координатах вершин чотирикутника.

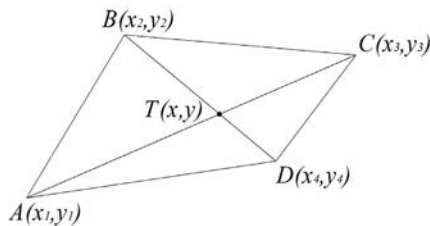


Рис. 8. Схема до визначення координат оптимальної точки для чотирикутника

Складемо рівняння діагоналей:  
діагональ AC

$$\frac{y - y_3}{y_3 - y_1} = \frac{x - x_3}{x_3 - x_1} \quad ; \quad y - y_3 = \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} (x - x_3) \quad (6)$$

діагональ BD

$$\frac{y - y_4}{y_4 - y_2} = \frac{x - x_4}{x_4 - x_2} \quad ; \quad y - y_4 = \frac{y_4 - y_2}{x_4 - x_2} (x - x_4) \quad (7)$$

Координати оптимальної точки зводу для чотирьох точок знаходимо як рішення системи рівнянь (діагоналей AC і BD):

$$x = \frac{(y_3 x_1 - y_1 x_3) \times (x_4 - x_2) - (y_4 x_2 - y_2 x_4) \times (x_3 - x_1)}{(y_3 - y_1) \times (x_4 - x_2) - (y_4 - y_2) \times (x_3 - x_1)} \quad (8)$$

$$y = \frac{(x_3 y_1 - x_1 y_3) \times (y_4 - y_2) - (x_4 y_2 - x_2 y_4) \times (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1) \times (y_4 - y_2) - (x_4 - x_2) \times (y_3 - y_1)} \quad (9)$$

Наведені формули дозволяють знайти координати оптимальної точки  $T$  для довільного опуклого чотирикутника, якщо його вершини рівноважені. Їх можна використовувати в економіко-математичних моделях та для оптимізації логістичних схем.

Цікавою особливістю є те, що координати оптимальної точки  $T$  не залежать від розмірів чотирикутника ABCD та його форми (кутів). Якщо видаляти одну або всі вершини уздовж прямих, що визначаються діагоналями чотирикутника, то положення точки  $T$  не змінюється.

Проведемо більш детальне дослідження для часткового випадку чотирикутників – ромба (одного з видів симетричних чотирикутників).

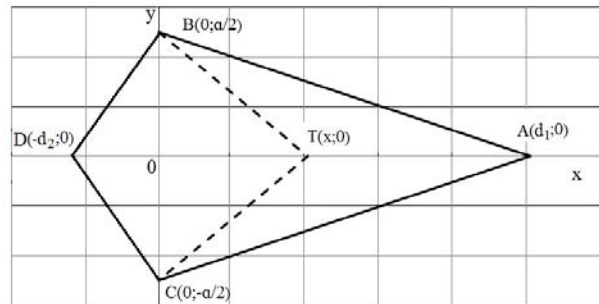


Рис. 9. Схема для визначення координат оптимальної точки Ферма-Торрічеллі для ромба

Нехай діагоналі ромба дорівнюють  $BC = a$  та  $AD = d = d_1 + d_2$ . Сума відстаней від довільної точки горизонтальної діагоналі  $T(X; 0)$  до вершини ромба дорівнює:

$$F(x) = 2\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}} + (d_1 - x) + (d_2 + x) \quad (10)$$

Прирівнявши похідну до нуля, знаходимо  $x=0$ . Ми показали, що для рівноважених вершин ромба оптимальною точкою Ферма-Торрічеллі є точка перетину діагоналей. Але ми можемо додатково дослідити як змінюється сума відстаней до вершин ромба (рис. 10) при віддаленні точки  $T$  від початку координат (оптимальної точки).

$$F(x) = 2\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}} + d; \quad (d = d_1 + d_2) \quad (11)$$

Елементарними перетвореннями можна показати, що функція (11) є рівнянням вертикальної гіперболи:

$$\frac{(y - d)^2}{a^2} - \frac{x^2}{(a/2)^2} = 1$$

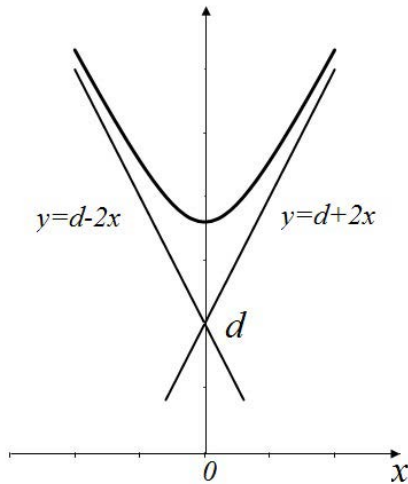


Рис. 10. Зміна суми відстаней від точки Т до вершин ромба при її віддаленні від початку координат. Прийнято  $d_1 = d_2 = d/2$

Центр гіперболи зміщений на  $d$  одиниць вгору, півосі дорівнюють  $a$  (вздовж осі ОУ) та  $a/2$  (вздовж осі ОХ).

Функція приймає найменше значення  $d + a$  (сума діагоналей) при  $x=0$ . Графік має асимптоти  $y=d+2x$ . При віддаленні точки Т від початку координат сума відстаней до вершин ромба зростає майже пропорційно  $2x$ . Функція приймає найбільше значення при  $x=\pm d/2$ :

$$F_{\max} = \sqrt{a^2 + d^2} + d$$

Тангенс кута нахилу асимптоти для функції (11) вдвічі більший, ніж для функції (1). При відхиленні точки від оптимальної сума відстаней до вершин ромба зростає вдвічі швидше, ніж для трикутника. Це необхідно враховувати при розгляді прикладних задач, наприклад мінімізації транспортної роботи. При відхиленні точки зведення від оптимальної точки Ферма-Торрічеллі об'єм транспортної роботи для чотирьох заданих точок зростає вдвічі швидше, ніж для трьох.

Запропонована схема дозволяє дослідити випадок нерівнозважених вершин ромба. Нехай  $Q_C = Q_B = Q_D = Q$ ;  $Q_A = K \cdot Q$ . Тоді

$$F(x) = 2\sqrt{x^2 + \frac{a^2}{4}} + K(d_1 - x) + (d_2 + x) \quad (12)$$

Прирівнявши похідну до нуля, знаходимо

$$x = \frac{a \cdot (K - 1)}{2\sqrt{4 - (K - 1)^2}} \quad (13)$$

При  $K = 1$ , знаходимо  $x = 0$  (точка перетину діагоналей),

при  $K = 2$ ;  $x = a \cdot \sqrt{3} / 6$  (як для трикутника СВА при рівнозважених вершинах).

Якщо  $K \rightarrow 3$ ;  $x \rightarrow \infty$ . Вершина А може бути оптимальною точкою зведення при довільному віддаленні ( $d_1$ ). Знаходимо значення  $K$ , при якому вершина А буде оптимальною:

$$K = 1 + \frac{2d_1}{\sqrt{d_1^2 + \frac{a^2}{4}}} \quad (14)$$

Очевидно, що завжди  $K < 3$ , але  $K \rightarrow 3$  при  $d_1 \rightarrow \infty$ .

Вершина ромба може бути оптимальною точкою при менш ніж трикратному перевищенні об'єму перевезень з цієї вершини.

При  $d_1 = a / 2$ ;  $K = 1 + \sqrt{2} \approx 2,41$

При  $d_1 = a$ ;  $K = 1 + 4 / \sqrt{5} \approx 2,79$

В подальшому планується дослідження для більшої кількості точок ( $n > 4$ )

#### Висновки та напрямок подальших досліджень.

Геометрична задача знаходження оптимальної точки Ферма-Торрічеллі має велике прикладне значення і застосовується в багатьох практичних задачах. Наведений аналіз історії задачі показує, що протягом XVII-XIX століть були одержані та обґрунтовані геометричні методи для трьох та чотирьох точок (тільки рівнозважених).

Запропонований метод вибору системи координат дозволяє знайти координати точки Ферма-Торрічеллі як для рівнозважених, так і різнозважених точок (для  $n=3$  та  $n=4$ ). Це дозволило провести дослідження характеру зміни об'єму транспортної роботи, встановити умови, при яких одна із заданих точок буде оптимальною.

В подальшому планується провести більш детальне дослідження для різного виду трикутників та чотирикутників, розглянути багатокутники при  $n > 4$ .

#### Список літератури:

1. Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективності їх роботи в умовах змінної кон'юнктури світового ринку залізорудної сировини : монографія / Є. К. Бабець, І. Є. Мельникова, С. Я. Гребенюк, С. П. Лобов; за ред. Є. К. Бабця; НДГРІ ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг : Вид. Р. А. Козлов, 2015. 391 с.
2. Плотников О. В. Економічні оцінки залізорудних родовищ у фінансових та інвестиційних проектах. Кривий Ріг: Мінерал, 2006. 274 с.
3. Vilkul Y., Slobodyanyuk V., Maximov I. Optimization of location and performance parameters for the crushing and transfer stations in the deep open pit mines Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal, Publishing House "St. Ivan Rilski", Sofia, 2021 Volume 2, 74-79

4. Максимова І.І., Слободянюк Р.В. Особливості визначення раціонального положення перевантажувального пункту. *Матеріали 11-ї міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку будівельних технологій»*. Дніпропетровськ: НГУ. 2017. С. 43-47.
5. Kupitz, Ya. S. The Fermat–Torricelli Problem, Part I: A Discrete Gradient-Method Approach / Ya. S. Kupitz, H. Martini, M. Spirova. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2013. Vol. 158, No. 2. P. 305-327.
6. Krarup, J.; Roos, K. On the Fermat point of a triangle. *Nieuw Arch. Voor Wiskd.* 2017, 5, 280–286
7. *Geometric Methods and Optimization Problems*, Kluwer, Dordrecht, 1999, 429 pp.
8. Hajja, M. A complete analytical treatment of the weighted Fermat–Torricelli point for a triangle / M. Hajja, A. Zachos. *Journal of Geometry*. 2017. Vol. 108, No. 1. P. 99-110.
9. Courant R., Robbins H., Stewart I. *What Is Mathematics? An Elementary Approach to Ideas and Methods* 2nd ed. – Oxford University Press, 1996. – 588 p.
10. Максимов І.І., Слободянюк В.К., Максимова І.І. Особливості визначення координат точки Ферма-Торрічеллі для рівнобедрених трикутників. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2023. № 8. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-8-8855>

**Maksymov I.I., Slobodyanyuk V.K., Maksymova I.I. ANALYTICAL DETERMINATION OF FERMAT-TORRICELLI POINT COORDINATES AND MINIMIZATION OF TRANSPORT WORK**

*In mathematics, the Fermat-Torricelli point provides the minimum distance to the top of the triangle. A universal analytical formula for determining the Fermat-Torricelli point coordinates for a free convex polygon has not been found at the present moment. However, the solution can be obtained for symmetric polygons.*

*This work aims to develop a methodological basis for determining the coordinates of the point of the minimum transport work and to study the influence of the location of the polygon vertices on this point.*

*The article provides an overview of modern research in which algorithms using the Fermat-Torricelli point are used to minimize logistics processes. Methods of mathematical optimization and analytical geometry are used in the work.*

*Analytical geometry methods have established formulas for determining the coordinates of the optimal transportation point for the number of points  $n=3$  and  $n=4$ .*

*For the needs of many branches of science and technology, developing a method that allows predicting the effect of unbalanced points on the position of the point that ensures a minimum of transport work is of practical importance. An example of such a problem is the search for the optimal location of a processing plant, to which of several points the same (balanced points) or different (unbalanced points) volume of raw materials is delivered. At the same time, the volume of transport work for raw material delivery is minimized. It is shown that the center of gravity does not always coincide with the Fermat-Torricelli point but can be used only as a preliminary solution to the problem.*

*For unbalanced points, there are no geometric methods of solution. However, the method offered in this paper allows for finding the optimal point coordinates for both equally weighted and unbalanced points. In addition, a study was conducted on the change in the volume of transport work when the pickup point deviates from the optimal Fermat-Torricelli point, which is impossible to do with geometric methods. The research established the conditions under which one of the unbalanced points will be optimal.*

**Key words:** *Fermat-Torricelli point, coordinates of the optimal point, minimization of transport work, unbalanced vertices, center of gravity.*

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

---

УДК 621.791.92

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/02>

**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

**Кагляк О.Д.**

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

**Шамсутдінова Н.О.**

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

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Данилейко О.О.**

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

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СТВОРЕННЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА СИСТЕМИ ПОШУКУ МІСЦЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ

*Автоматизація технологічних процесів піднімає якість виробництва на рівень, який практично недосяжний для людини, тобто дозволяє контролювати виробничий процес, не беручи участь в ньому безпосередньо. Завдяки комплексній автоматизації виробничих процесів підвищується їх продуктивність, оскільки отримання та використання даних для управління і контролю здійснюється автоматично. На сучасних підприємствах автоматизація виробництва здійснюється з метою підвищення надійності устаткування, зниження собівартості продукції, збільшення продуктивності, поліпшення умов праці і створення виробництва більш безпечного для людини. Автоматизація технологічних процесів в рамках одного виробничого процесу дозволяє організувати основу для впровадження систем управління виробництвом і систем управління підприємством. Таким чином, розробка нових і вдосконалення існуючих засобів автоматизованого управління і контролю є досить важливим і актуальним завданням. Автоматизація процесу пошуку місця зварювання (виявлення положення стику) при виконанні операції встановлення заглушки при ремонті колектору парогенераторів типу ПГВ-1000 для АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000, яка є метою даної роботи, має відношення як раз до таких актуальних задач. Розроблено та виготовлено елементи кріплення макетного зразка системи пошуку місця зварювання та проведено адаптацію його складових частин з існуючим стендом для лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору парогенератору. В ході експериментальних досліджень з лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань зі сталей 10X18H10T і 10X17H13M3T, на зразках типу «труба-пластина», які моделюють встановлення заглушки у теплообмінну трубку парогенератору ПГВ-1000, виконано функціональні випробування виготовленого макетного зразка системи пошуку місця зварювання. Встановлено відповідність контрольним значенням, параметрів усіх необхідних характеристик створеного обладнання. Прогнозні припущення про розвиток об'єкту досліджень – використання одержаних результатів в атомній промисловості при виконанні ремонту колекторів та відновлення працездатності парогенераторів типу ПГВ-1000, шляхом вварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору парогенератору з використанням технологій лазерного зварювання.*

**Ключові слова:** парогенератор АЕС, ремонт, теплообмінна трубка, встановлення заглушок, лазерне зварювання, система пошуку місця зварювання.

**Постановка проблеми.** На сьогодні розвиток технологій зробив можливими ефективно впровадження систем автоматизованого управління і контролю в різні галузі промисловості. Автоматизація технологічних процесів піднімає якість виробництва на рівень, який практично недосяжний для людини, тобто дозволяє контролювати виробничий процес, не беручи участь в ньому безпосередньо. Завдяки комплексній автоматизації виробничих процесів підвищується їх продуктивність, оскільки отримання та використання даних для управління і контролю здійснюється автоматично. На сучасних підприємствах автоматизація виробництва здійснюється з метою підвищення надійності устаткування, зниження собівартості продукції, збільшення продуктивності, поліпшення умов праці і створення виробництва більш безпечного для людини. Автоматизація технологічних процесів в рамках одного виробничого процесу дозволяє організувати основу для впровадження систем управління виробництвом і систем управління підприємством. Таким чином, розробка нових і вдосконалення існуючих засобів автоматизованого управління і контролю є досить важливим і актуальним завданням. Автоматизація процесу пошуку місця зварювання (виявлення положення стика) при виконанні операції встановлення заглушки у теплообмінну трубку при ремонті колектору парогенераторів типу ПГВ-1000 для АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000, яка є метою даної роботи, має відношення як раз до таких актуальних задач.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоматизація процесів зварювання та реалізація адаптивних технологій в системах автоматичного управління зварювальним устаткуванням є істотним резервом у забезпеченні відтворюваності якості зварних з'єднань, підвищенні експлуатаційної надійності виробів, скорочення термінів виконання робіт [1–3].

Технічне рішення завдання з автоматизації процесів зварювання може бути зведено до оснащення зварювального обладнання безконтактними датчиками та адаптивною системою управління, що забезпечують наведення на стик зварювальної головки та стеження за траєкторією шва (геометрична адаптація), а також, прогнозування появи дефектів зварювальних з'єднань на основі інформації про геометричні параметри зварного з'єднання [4–6].

Варто відзначити, що особливістю процесів лазерної обробки є надзвичайно малий розміру теплового джерела, що утворюється під дією сфо-

кусованого лазерного випромінювання в оброблюваному матеріалі, що висуває вимогу підвищеної точності такої обробки [7]. Крім того, в зв'язку з високими швидкостями обробки її необхідно вести в автоматичному режимі. Для цього необхідна сучасна система одночасного спостереження за процесом і траєкторією обробки.

**Метою роботи є** створення макетного зразка системи пошуку місця зварювання (виявлення положення стика) при виконанні операції встановлення заглушки у теплообмінну трубку при ремонті колектору парогенераторів типу ПГВ-1000 для АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000. Для досягнення поставленої мети, необхідно було вирішити наступні завдання: розробити макетний зразок системи пошуку місця зварювання; виготовити елементи та деталі макетного зразка системи пошуку місця зварювання; провести комплекс функціональних випробувань макетного зразка системи пошуку місця зварювання.

**Виклад основного матеріалу.** Для розробки макетного зразка системи пошуку місця зварювання був задіяний датчик вимірювання профілю поверхні Riftek RF625. В основу роботи датчика RiftekRF625 покладено принцип оптичної триангуляції. Випромінювання напівпровідникового лазера формується у вигляді лінії і проектується на об'єкт. Розсіяне на об'єкті випромінювання об'єктивом збирається на двовимірній CMOS-матриці. Отримане зображення контуру об'єкта аналізується програмованою користувачем вентильною матрицею і сигнальним процесором, який розраховує відстань до об'єкта (координата  $Z$ ) для кожної з безлічі точок уздовж лазерної лінії на об'єкті (координата  $X$ ). Датчик характеризується початком робочого діапазону ( $S_{MR}$ ) по координаті  $Z$ , робочим діапазоном ( $MR, Z_{DIAP}$ ) по координаті  $Z$ , робочим діапазоном по координаті  $X$  на початку робочого діапазону по  $Z$  ( $X_{SMR}$ ) і в кінці робочого діапазону по  $Z$  ( $X_{EMR}$ ).

Триангуляційний датчик Riftek RF625 був встановлений на лабораторний стенд, що являє собою двохкоординатний маніпулятор, який складається з двох лінійних модулів. Перший модуль (площина  $YZ$ ) закріплений нерухомо на вертикальній колоні. Другий модуль (площина  $XZ$ ) встановлено горизонтально на рухомій каретці вертикального модуля. Триангуляційний датчик і зварювальний головка встановлені на каретці горизонтального модуля за допомогою кронштейнів і перехідних пластин і можуть переміщатися в площині  $XZ$ . Точність позиціонування становила  $\pm 0,05$  мм. Повторюваність складала  $\pm 0,02$  мм.

Датчик поставлявся з набором програмного забезпечення, доступним також на веб сайті компанії Riftek. У пакет входять документовані програмні засоби, що дозволяють реалізувати три варіанти роботи зі датчиком:

1. За допомогою сервісної програми від Riftek.
2. За допомогою програмного забезпечення, розробленого користувачем з використанням наданого SDK (Software Development Kit). У комплект RFDDevice SDK включені докладний опис всіх функцій бібліотеки і приклади програм на різних мовах (C ++, Pascal), портированих на різні платформи (Windows, Linux, .NET), а також приклади використання бібліотек в різних середовищах (MATLAB, LABVIEW).

3. За допомогою розробленого користувачем програмного забезпечення, що реалізує протоколи передачі даних датчика.

В процесі проведення технологічної адаптації датчика в рамках проведення даних робіт, був обраний варіант програмної взаємодії з датчиком за допомогою розробленого користувачем програмного забезпечення, так як він забезпечує найбільшу свободу і гнучкість в процесі створення призначених для користувача прикладних програм для роботи з датчиком.

Для проведення налагодження створюваного програмного забезпечення користувача, також використовувався програмний емулятор датчика Riftek RF625, призначений для розробки користувальницького програмного забезпечення без використання датчика. Програма-емулятор імітує наявність підключеного по мережі датчика і посилає такі ж пакети даних і пакети виявлення як і справжній реальний датчик. Для імітації вимірювань профілю використовується графічне вікно, в якому користувач може намалювати довільну криву. Ця крива лінія інтерпретується емулятором як вимірюваний профіль поверхні (рис. 1). Точки цієї кривої відповідним чином обробляються і передаються по мережі у вигляді пакету даних.

Функціональні випробування виготовленого макетного зразка системи пошуку місця зварювання виконували на зразках типу «труба-пластина» (рис. 2), в ході експериментальних досліджень з лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань зі сталей 10X18N10T (труба) і 10X17N13M3T (пластина). Даний зразок моделює встановлення заглушки у теплообмінну трубку парогенератору.

Роботи з функціональних випробувань виготовленого макетного зразка системи пошуку місця зварювання виконували на лабораторному стенді для зварювання у вертикальному положенні (рис. 3), який

був змонтований на базі Nd:YAG-лазеру «DY044», виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина).

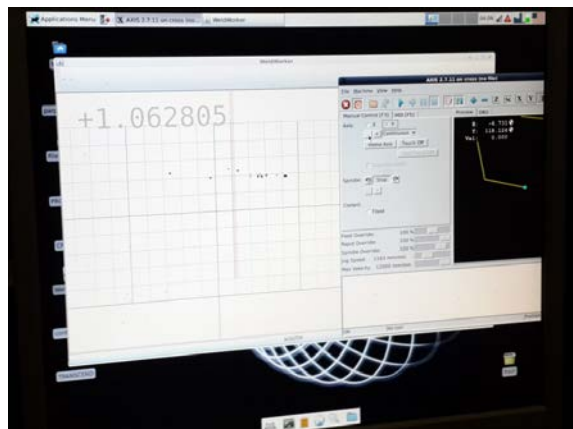


Рис. 1. Фото зображення на екрані монітору графічної інформації, яка передана з датчика Riftek RFRF625

Положення макетного зразка системи пошуку місця зварювання, закріпленого на лабораторному стенді для лазерного зварювання показано на рис. 4 та рис. 5.



Рис. 2. Зразок зварного з'єднання № 1336 типу «пластина-труба»

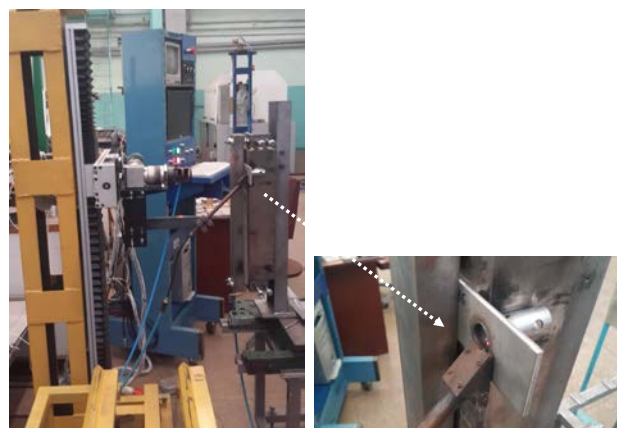


Рис. 3. Лабораторний стенд (а) для експериментальних досліджень з лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань (б) з різномірних сталей у вертикальному просторовому положенні



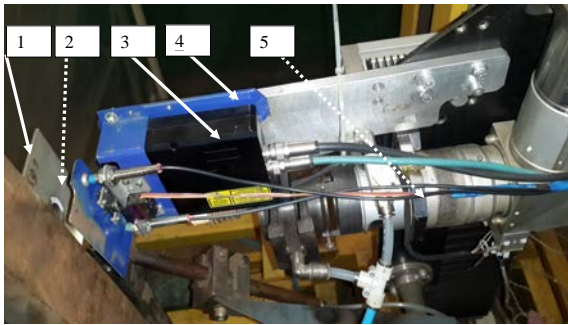


Рис. 4. Макетний зразок системи пошуку місця зварювання: 1 – зразок, що зварюється; 2 – лінія, згенерована датчиком RiftekRF625; 3 – датчик RiftekRF625; 4 – кронштейни системи кріплення; 5 – лазерна зварювальна головка (частина)

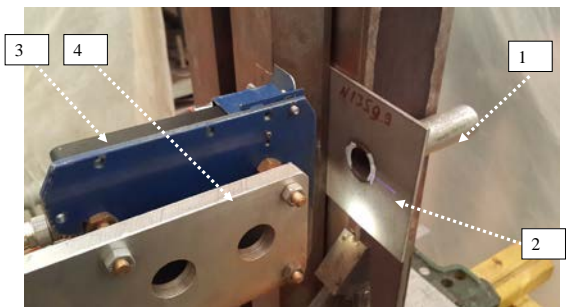


Рис. 5. Положення макетного зразка системи пошуку місця зварювання, закріпленого на лабораторному стенді для лазерного зварювання: 1 – зразок, що зварюється; 2 – лінія, згенерована датчиком RiftekRF625; 3 – датчик RiftekRF625; 4 – кронштейни системи кріплення

На рис. 6 наведено систему керування лабораторного стенда для експериментальних досліджень з лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань з різномірних сталей у вертикальному просторовому положенні.



Рис. 6. Система керування лабораторного стенда для експериментальних досліджень з лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань з різномірних сталей у вертикальному просторовому положенні

Інформація з відеокамери (яка розташована співвісно (та співфокусно) з віссю лазерного випромінювання), у вигляді графічного зображення поступає на монітор. На екрані комп'ютерного монітора, розташованого по центру стійки керування та рис. 6, відображається загальна інформація з системи керування, у тому числі інформація яка поступає з лазерного триангуляційного датчика RiftekRF625 (рис. 7). Таким чином, оператор має можливість візуального контролю та перевірки правильності визначення системою відносного положення місця зварювання та умовного положення сфокусованого променя лазерного випромінювання (перехрестя).

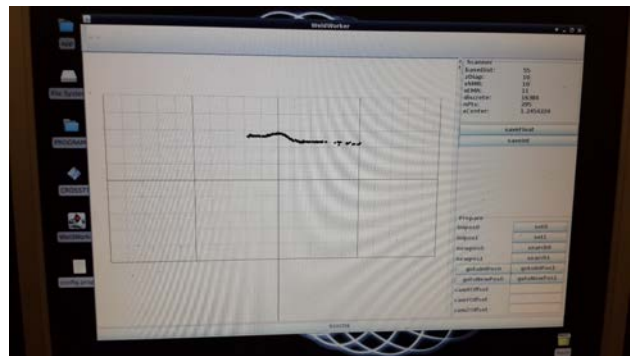


Рис. 7. Зображення інформації, яка поступає з лазерного триангуляційного датчика RiftekRF625

На рис. 7 показаний приклад відображення інформації у вигляді графічного зображення при проведенні функціональних випробувань виготовленого макетного зразка системи пошуку місця зварювання на зразках типу «труба-пластина», що імітують зварювання заглушок.

#### Висновки.

1. Розроблено та виготовлено елементи кріплення макетного зразка системи пошуку місця зварювання та проведено адаптацію його складових частин з існуючим стендом для лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору парогенератору.

2. В ході експериментальних досліджень з лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань зі сталей 10X18H10T і 10X17H13M3T, на зразках типу «труба-пластина», які моделюють встановлення заглушки у теплообмінну трубку парогенератору ПГВ-1000, виконано функціональні випробування виготовленого макетного зразка системи пошуку місця зварювання. Встановлено відповідність контрольним значенням, параметрів усіх необхідних характеристик створеного обладнання.

3. Прогнозні припущення про розвиток об'єкту досліджень – використання одержаних результатів в атомній промисловості при виконанні ремонту колекторів та відновлення працездатності парогенераторів типу ПГВ-1000, шляхом вварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору парогенератору з використанням технологій лазерного зварювання.

#### Список літератури:

1. Shin S., Jin C., Yu J., Rhee S. Real-time detection of weld defects for automated welding process base on deep neural network. *Metals*. 2020. Vol. 10. №3. Id 389. <https://doi.org/10.3390/met10030389>
2. Sharma A., Sharma K., Islam A., Roy D. Effect of welding parameters on automated robotic arc welding process. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26. Pp. 2363-2367. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.507>
3. Tsuzuki R. Development of automation and artificial intelligence technology for welding and inspection process in aircraft industry. *Welding in the World*. 2022. Vol. 66. №1. P.p. 105-116. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01210-3>
4. Wang B., Hu, S. J., Sun L., Freiheit T. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 56. Pp. 373-391. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020>
5. Zhang L., Basantes-Defaz A.C., Ozevi, D., Indacochea E. Real-time monitoring of welding process using air-coupled ultrasonics and acoustic emission. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. Pp. 1623-1634. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3042-2>
6. Oh W.B., Yun T.J., Lee B.R., Kim C G., Liang Z.L., Kim I. S. A study on intelligent algorithm to control welding parameters for lap-joint. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 30. Pp. 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.008>
7. Yusof M.F.M., Ishak M., Ghazali M.F. Weld depth estimation during pulse mode laser welding process by the analysis of the acquired sound using feature extraction analysis and artificial neural network. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 63. Pp. 163-178. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.004>

**Bernatskyi A.V., Siora O.V., Kaglyak O.D., Shamsutdinova N.O., Danyleiko O.O.**

#### **CREATING A PROTOTYPE SAMPLE OF A SYSTEM FOR SEARCHING THE LOCATION OF A WELDED JOINT FOR LASER WELDING**

*Automation of technological processes raises the quality of production to a level that is practically unattainable for humans, that is, it allows you to control the production process without directly participating in it. Due to the comprehensive automation of production processes, their productivity increases, since the acquisition and use of data for management and control is carried out automatically. At modern enterprises, production automation is carried out with the aim of increasing the reliability of equipment, reducing the cost of production, increasing productivity, improving working conditions and creating production that is safer for people. The automation of technological processes within the framework of one production process allows you to organize the basis for the implementation of production management systems and enterprise management systems. Thus, the development of new and improvement of existing means of automated management and control is a rather important and urgent task. Automation of the process of finding the welding place (detection of the position of the joint) when performing the plug installation operation during the repair of the steam generator manifold of the PGV-1000 type for nuclear power plants with reactors of the VVER-1000 type, which is the goal of this work, is related to such urgent tasks. Fastening elements of the mock-up sample of the welding location search system were developed and manufactured, and its components were adapted to the existing stand for laser welding of plugs in the heat exchange tubes of the steam generator collector. In the course of experimental research on laser welding of ring welded joints made of 10Kh18N10T and 10Kh17N13M3T steels, functional tests of the manufactured mockup of the welding location search system were performed on "tube-plate" type samples that simulate the installation of a plug in the heat exchange tube of the PGV-1000 steam generator. Compliance with control values, parameters of all necessary characteristics of the created equipment was established. Predictive assumptions about the development of the research object - the use of the obtained results in the nuclear industry in the repair of collectors and restoration of the performance of steam generators of the PGV-1000 type, by welding plugs into the heat exchange tubes of the steam generator collector using laser welding technologies.*

**Key words:** NPP steam generator, repair, heat exchange tube, plug installation, laser welding, system for searching the location of a welded joint.

# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 531.7.08

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/03>**Павленко В.Я.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## ІНДИКАТОРНИЙ ІНСТРУМЕНТ ЯК ЗАПОРУКА ЯКОСТІ В ПРАКТИЦІ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ: МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

*Якість, і відповідно, конкурентоспроможність продукції багато в чому визначаються станом виміральної техніки на підприємстві. Контроль лінійних величин є найбільш розповсюдженою областю вимірювань в науці та техніці – він є складовою частиною технічних вимірювань завдяки яким визначаються розміри деталей та виробів або окремих їх елементів. Вимірвальна техніка є невід’ємною частиною будь-якого виробництва, адже, в залежності від специфіки виробництва та конструкторської документації, вимірювання проводяться в різних діапазонах значень та з різною точністю. У статті розглянуто особливості індикаторних вимірвальних інструментів, проблеми вибору засобів та методів контролю геометричних розмірів деталей та складальних одиниць класів точності (0–12) квалітетів<sup>1</sup> а також вимірювань у важкодоступних місцях (зовнішні та внутрішні діаметри, глибини отворів, параметри різьби, зубчасті зчеплення, паралельність площин та ін.). Стверджено, що при виборі вимірвального інструмента враховують розмір деталі або виробу, метод та умови проведення вимірювань, квалітет (клас точності) вимірюваної продукції, допустиму похибку засобу вимірювань.*

*Проаналізовано види індикаторів, розтлумачено про кожну сферу їх застосування, обґрунтовано доцільність застосування того чи іншого виду індикатора, надано рекомендації щодо вибору вимірвального інструмента в залежності від умов конструкторської документації, технологічного процесу і конструкції виробу.*

**Ключові слова:** засоби вимірювання, вимірвальний інструмент, методи контролю, індикатори, похибка вимірювань.

**Постановка проблеми.** В серійному виробництві механічних деталей та при виконанні слюсарних та складальних робіт, де відхилення від заданого розміру на мікрометр загрожує відбракуванням, контроль якості вимірювань повинен бути не тільки точним, але й швидким. У більшості випадків для рішення подібних задач використовують індикатори (високоточні вимірвальні головки), які по точності вимірювань перевершують інші вимірвальні інструменти. При вимірюванні штангенінструментом ми отримуємо точність до десятих або сотих міліметра (в залежності від моделі), тоді як, при застосуванні індикаторів показана точність до тисячної долі міліметра. Індикаторний інструмент може використовуватись для вимірювань величини відхи-

лень від заданої геометричної форми чи взаємного розташування поверхонь або як показувальний пристрій індикаторної скоби, індикаторного глибиноміра або індикаторного нутроміра. Важливо чинити зважений висновок вибору вимірвальних інструментів відповідно до розмірів і допусків при виготовленні деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процесам контролю якості (методам та засобам вимірювання) присвячено багато теоретичних і практичних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених. Дослідженнями цих питань займалися такі науковці, як Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., Артюхов О.М., Адаменко Ю.І., Майданюк С.В., Мініцька Н.В., Плівак О.А., Ушенко О.Г., Житарюк Д.І. та ін. [1, 5, 9]. Багато публікацій щодо оцінки індикаторів різних видів [2, 3, 6, 7, 8], але всі вони переважно довідкового або рекламного характеру. Тоді як практичних рекомендацій щодо вибору індикаторного інструмента із врахуванням

<sup>1</sup> Квалітетом називають характеристику точності виготовлення деталі або виробу, яка визначає допуски на виготовлення (виробництво), відповідно, методи і засоби обробки, контролю. В Україні передбачено 20 квалітетів: 01; 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; S; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 1S [10].

розмірів деталей, методів та умов проведення вимірювань, якості (класу точності), допустимої похибки та засобу вимірювань обмаль. Тому, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам метрології, ця стаття може бути корисною для виробників та служб контролю якості.

**Постановка завдання.** Мета статті – ознайомити читача з видами індикаторів, методами та способами вимірювань деталей з особливими вимогами. Оцінити переваги та недоліки різних видів індикаторів з ціллю раціонального вибору інструмента для дослідного та серійного виробництва.

Користування неправильно підібраним інструментом приводить до того, що деталі, прийняті за результатами вимірювання як придатні, можуть виявитися непридатними чи навпаки, а при складанні, деталі, перевірені не досить точним інструментом, можуть дати інші зазори або натяги, ніж це передбачав конструктор. Тому треба враховувати показники безперебійної роботи індикаторів, які обумовлені властивостями матеріалів, точністю складання, наявністю сертифікатів щодо проходження метрологічних випробувань. Наприклад, для запобігання зниження амортизації (абразивного старіння) вимірювальні наконечники індикаторів та вимірювальних головок покривають твердим сплавом, а при роботі в агресивному середовищі, при підвищеній запиленості, вологості та вібраціях випускаються індикатори в герметичному нержавіючому корпусі зі ступенем захисту IP65<sup>2</sup>. Не менш важливою деталлю є зручність при вимірюваннях. Скажімо, цифрові індикатори оснащені функцією автоматичного встановлення нуля та кнопками для перемикання одиниць вимірювання, а великі цифри на дисплеї полегшують напруження зору. Деякі види цифрових індикаторів мають інтерфейси для передачі даних на ПК (що пришвидшує роботу оператора), а також мають функції введення границь та різних режимів вимірювань.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** *Індикатори* – це відлікові пристрої, що перетворюють малі переміщення вимірювального стрижня у великі переміщення стрілки за шкалою тобто здійснюють індикацію зміни якогось параметра контрольованого процесу у формі, зручній для візуального сприйняття. Індикаторами вимірюють відхилення розташування площин деталей, а також овальність, конусоподібність, бочкоподібність

валів і циліндрів, биття зубчастих коліс, шпинделів, шківів та інших деталей типу тіл обертання. В залежності від способу переміщення механізму поділяються на: індикатори годинникового типу; важільно-зубчасті індикатори; пружинні індикатори, багатооборотні індикатори.

Треба розуміти, що індикатори працюють тільки в сукупності з допоміжними засобами: штативами, скобами, контрольними пристосуваннями. Після закріплення індикатора на тримачі (штативі) спочатку необхідно встановити на шкалі нульове значення – закріпити на столику тримача еталонну міру та провести контрольне калібрування обертаючи ободок шкали індикатора, доки не відбудеться збіг стрілки з нульовою позначкою. Після такої, на перший погляд, нехитрої операції індикатор готовий до вимірювань: вироби або деталі акуратно, без ударів закріплюються під вимірювальним наконечником і вимірюються у будь-якій точці площини. Індикатор показує величину відхилення розмірів від еталона, що спрощує безперервний контроль однотипних деталей – оператору немає необхідності щоразу рахувати різницю розмірів самостійно.

Розглянемо основні види індикаторів по порядку.

*Індикатори годинникового типу* є найбільш застосовуваними на підприємствах машинобудування, металургійного комплексу, в ремонтних майстернях та ін. і є найбільш розповсюдженими для відносних вимірювань [2]. Вимоги до характеристик вказані в ДСТУ ГОСТ 577:2009 [11].

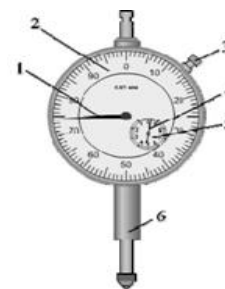


Рис. 1. Індикатор годинникового типу:

Стандарт регламентує виготовлення індикаторів годинникового типу з діапазонами вимірювань (0–2) мм, (0–5) мм, (0–10) мм, (0–25) мм.

Індикатор годинникового типу (рисунок 1) з ціною поділки 0,01 мм із пересуванням вимірювального стрижня паралельно до шкали призначений для відносних вимірювань зовнішніх розмірів, відхилень форми і розташування поверхонь а також є показувальним пристроєм індикаторної скоби, індикаторного глибиноміра й індикаторного

<sup>2</sup> IP ступінь захисту (міра захисту), що перевіряється стандартними методами випробувань, який унеможливує попадання зовнішніх предметів всередину оболонки.

нутроміра. На лицьовому боці циферблата індикатора є дві стрілки і дві шкали; велика стрілка (1) над оцифрованою круглою шкалою (2) і мала стрілка (4) над відліковою шкалою (5). Кругова шкала має ціну поділки 0,01 мм, а мала шкала – 1 мм. Пересування вимірювального стрижня (6) на 1 мм викликає поворот стрілки (1) на 100 поділок (один повний оберт), а стрілки (4) – на одну поділку. Шкала (2) індикатора разом із ободком при установці шкали на нульову поділку повертається відносно великої стрілки (1) і фіксується стопором (3). Такі індикатори знайшли своє застосування у контрольно-вимірювальних операціях у машинобудуванні для проведення вимірів (5–10) класів точності, у випадку, коли інші засоби вимірювань не забезпечують заданої точності. Використовуються у виробництві для контролю точності встановлення предметів обробки на технологічному обладнанні та для контролю відхилень розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь деталей та вузлів. Основні переваги індикатора годинникового типу – універсальність і простота використання при високій точності вимірювань.

*Вимірювальна головка* – це конструктивно відокремлений вузол, що містить корпус з передавальним механізмом, шкалою і покажчиком, рухомий стрижень з вимірювальним наконечником і елементи кріплення [8]. Головки використовують для порівняльних вимірювань і перевірки відхилень форми, розмірів і взаємного розташування поверхонь деталей і складальних одиниць. За принципом дії вимірювальні головки розділяють на пружинні, важільно-зубчасті, важільні.

*Важільно-зубчастий індикатор ІРБ* – сучасне обладнання, яке використовують для відносних а також абсолютних вимірів лінійних розмірів [3]. З його допомогою контролюються різні відхилення від певної геометричної форми. Прилад має спеціальний вимірювальний поворотний важіль. Він відрізняється невеликими габаритними розмірами і можливістю бічної дії індикатора. Це дозволяє застосовувати його в різних важкодоступних місцях складних деталей та конструкцій. Використовуючи такий індикатор, можна легко визначити відхилення розмірів конструкцій відносно певного еталона. Похибка вимірювань при цьому є мінімальною.

Працює таке обладнання за принципом порівняння еталона з деталями, що вимірюються. Індикатор закріплюють на додатковому допоміжному пристрої. Наприклад, це може бути спеціальна стійка або штатив з досить великою, потужною основою. Під стрижнем самого вимірюваль-

ного приладу встановлюють еталонний зразок. Застосовуються пристрої такого типу у багатьох галузях промисловості. Але найчастіше використовують їх саме у машинобудуванні, а також у металообробній галузі, у процесі виробництва різних деталей, пристроїв, серійних приладів та виробів. Перевагою важільно-зубчастих індикаторів є: висока точність вимірів; мінімальна похибка; простота конструкції; зручність в експлуатації; універсальність застосування; доступ до тих місць, які є недоступними для інших вимірювальних приладів; доступність у придбанні (невисокі ціни). Важільно-зубчасті індикатори ІРБ також застосовуються для вимірювання осевого та радіального биття методом порівняння розташування поверхні та відхилення форми.

*Багатооборотні індикатори* (рисунк 2) призначені для лінійних вимірювань методом безпосередньої оцінки або методом порівняння з еталонною мірою. Ціна поділки шкали 0,001 мм, а діапазон вимірювань від 0 до 1 мм. Вимірювальні головки бувають (0–1) класів точності [4].



Рис. 2. Загальний вигляд індикатора багатооборотного

Використовуються багатооборотні вимірювальні головки спільно зі стояками і штативами та іншими пристосуваннями для вимірювальних головок та індикаторів у різних галузях машинобудування і приладобудування. Їх вважають найточнішими важільно-механічними вимірювальними пристроями. У цього індикатора механізм перетворення лінійного переміщення вимірювального стрижня у кутове переміщення стрілки складається з важільних і зубчато-пружинних механізмів. Вимірювання відбувається контактним методом за допомогою вимірювальної головки. Особливістю конструкції є відсутність тертя завдяки чому досягається висока точність показників, а механізм індикатора влаштований так, що в процесі вимірювання тиск вимірювальної головки на деталь мінімальний, тобто він розвантажений від вимірювального зусилля, що підвищує довговічність приладу.

*Пружинні індикатори* це прилади з пружинним перетворювачем лінійного руху в обертальний [5, 6]. Внаслідок відсутності механічних передач ці прилади володіють простою конструкцією, високою точністю, стабільністю та надійністю.

Прилади з пружинною і пружинно-оптичною передачею випускають таких типів: головки вимірювальні пружинні типу ІПП (*мікрокатори*); головки вимірювальні пружинні малогабаритні типу ІПМ (*мікатори*); головки пружинні типу ІРП (*мінікатори*); головки вимірювальні пружинно-оптичні (*оптикатори*).

Застосування плоских пружин та мембран замість класичних механічних передач забезпечує їх надійну роботу в умовах запиленості, підвищеної вологості та вібрацій. В пружинних передачах для перетворення незначних переміщень вимірювального наконечника у значно більші переміщення візуального показчика (стрілки) використовуються плоскі, прямі, зігнуті або закручені пружні металеві стрічки.

Пружинні індикатори [6] випускаються з ціною поділки від 0,001 мм та діапазонами вимірювань від 0,08 мм до 0,600 мм і відрізняються універсальною точністю вимірювань, яка підходить для контролю розмірів виробів (0–7) класів точності.

Принцип роботи *мікрокатора* ІПП заснований на вимірюваннях довжини пружини під дією важеля, яке приводить у рух стрілку індикатора. Мікрокатори відносяться до пружинних вимірювальних головок, і мають низку переваг (відсутність «мертвого ходу»; мінімальне тертя в ланках механізму; похибку, яка досягає 0,0001 мм).

Мікрокатори призначені для абсолютних і відносних лінійних вимірювань, для контролю відхилення форми та розташування поверхонь. Мають широкий діапазон значень ціни поділки, володіють підвищеною точністю.

Істотним недоліком мікрокатора є застосування для відліку дуже тонкої, ледве помітної стрілки, що при тривалому застосуванні стомлює зір оператора. Окрім цього, розміщення стрілки на досить значній відстані від площини шкали збільшує похибку паралаксу. Також недоліком пружинних індикаторів є обмежений діапазон вимірювань.

*Мікатори і мінікатори* [7] мають такий же пружинний механізм, як і мікрокатори. Мікатори в залежності від типу мають ціну поділки шкали від 0,0002 мм до 0,002 мм і межі вимірювання за шкалою від  $\pm 0,010$  мм до  $\pm 0,100$  мм, тоді як мінікатори мають ціну поділки шкали 0,001 мм і 0,002 мм і межі вимірювання за шкалою  $\pm 0,04$  мм і  $\pm 0,08$  мм.

Пружинна малогабаритна вимірювальна головка – мікатор ІПМ за схемою аналогічна мікрокатору, але зі зменшеними габаритними розмірами і може використовуватись як відліковий пристрій в різних пристроях і приладах. Існують моделі мікаторів зі зменшеним вимірювальним зусиллям (до 50 Гс).

Головки вимірювальні важільно-пружинні типу ІРП (*мінікатори*) [7] призначені для вимірювання лінійних розмірів і відхилень форм у важкодоступних місцях. Відрізняються наявністю поворотного (на  $\pm 30^\circ$ ) вимірювального наконечника бічної дії. Приєднувальний діаметр: 4 мм. Головка укомплектована трьома наконечниками різної довжини та діаметра сфери. Залежно від довжини наконечника мінікатори можуть мати поділ шкали 0,001 мм або 0,002 мм. Мінікатори використовують для вимірювань відхилень у важкодоступних місцях (з подовженим наконечником проводяться вимірювання з точністю 0,002 мм в діапазоні 0–16 мм; з коротким наконечником 0,001 мм в діапазоні 0–8 мм).

Недоліком розглянутих пружинних голівок є низька вібростійкість.

Зазначеного недоліку позбавлений створений на базі мікрокатора оптикатор (рисунок 3) [6]. У ньому збережений пружинний чутливий елемент мікрокатора, але замість вказівної стрілки на середній частині пружинної стрічки закріплено дзеркало (1), яке має дуже малу інерційність, що дозволяє значно збільшити вібростійкість приладу.

Пучок променів від джерела світла (6) падає на дзеркало (1), проходячи через конденсор (5), скляну пластину (4) із нанесеним на ній вказівним штрихом і об'єктив (2). Після відбиття від дзеркала промені потрапляють на скляну шкалу (3), на якій з'являється зображення вказівного штриха, нанесеного на пластинці (4). При переміщенні вимірювального стрижня (7) і розкручуванні пружинної стрічки по шкалі (3) зображення штрихового показчика також переміщується.

Отже оптикатори об'єднують пружинний механізм з оптичною системою, а замість шкали зі стрілкою застосовується освітлювач та дзеркало. Таке поєднання розширює діапазон оптикаторів від (0–20) мм до (0–25) мм при абсолютних похибках від 0,0001 мм до 0,001 мм відповідно.

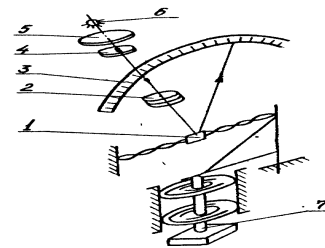


Рис. 3. Схема роботи оптикатора

Перевагою описаних приладів є простота конструкції і відсутність зовнішнього тертя в ланках механізму, що робить їх довговічними при високій точності вимірів.

Індикаторний інструмент за способом представлення результатів вимірювання поділяється на аналоговий, цифровий та комп'ютеризований.

Цифрове відображення (рисунок 4) гарантує безпомилкове зчитування значень вимірюваної величини, оскільки відпадає необхідність визначати візуально проміжні значення показань за шкалою по ноніусу. Аналогова індикація має переваги в тому, що забезпечує плавну зміну показань відповідно до розміру деталі. Аналоговий тип вимірювань найбільш застосовується для вимірювання в динамічному режимі, наприклад, коли потрібно визначити осьове і радіальне биття на тілах обертання чи поверхнях. Індикатори забезпечують точність вимірювань до 0,0025 мм. Цифрові індикатори мають багато додаткових функцій в порівнянні з механічними моделями, забезпечуючи відносні вимірювання та можливість передачі даних вимірювання на комп'ютер.



Рис. 4. Індикатор з цифровою індикацією

Останнім часом, найбільш застосовуваними залишаються індикатори з цифровою індикацією вимірюваної величини. Недоліком їх є відносна крихкість та необхідність заміни елементів живлення. Аналогова індикація індикаторів годинникового типу має перевагу в тому, що покази приладу плавно змінюються відповідно до зміни

контрольованого параметра у часі. Цей тип вимірювання зручно використовувати для динамічних вимірювань, наприклад, коли потрібно визначити осьове чи радіальне биття.

**Висновки.** Які ж індикатори кращі? При виборі індикатора слід орієнтуватися на співвідношення функціонування, якості та ціни. Під функціонуванням розуміють технічні характеристики індикатора, діапазон вимірювань, точність, спосіб кріплення на штативі на ін. Для прецизійних вимірювань при високій швидкості обертання валів підходять багатооборотні, пружинні і цифрові індикатори з точністю 0,0001 мм. А для вимірювань відхилень та лінійних розмірів габаритних виробів, для яких необхідний діапазон вимірювань вище 100 мм підійдуть пружинні індикатори (мікрокатори, мікатори та опикатори). Очевидно, що чим менша абсолютна похибка інструменту, тим менший діапазон його вимірювань. Також важливо розуміти, що точність інструмента з мінімальним тертям в перетворювачі (багатооборотні та пружинні індикатори) вища, ніж у звичайних часових індикаторах, але і їх конструкція складніша, а відповідно, надійність менша, а вартість вища. Наприклад, похибка індикатора часового типу 3%–5% вважається найвищою, але строк служби у них найбільший. Також слід зазначити, що вартість індикаторів залежить не тільки від технічних характеристик, але й від виробника. Відомі компанії, такі як Mitutoyo (Японія) або Mahr (Німеччина) вже більш як півстоліття виробляють високоякісне вимірювальне обладнання, піднімаючи планку іншим компаніям, весь час удосконалюють та розширюють функції індикаторів. Ціни на їх продукцію відповідні. Тому вибір за вами, але необхідно пам'ятати, що вибір засобів вимірювання без врахування розмірів деталі або виробу, методів та умов проведення вимірювань, якості (класу точності) вимірюваної продукції, допустимої похибки засобу призводить до небажаних наслідків.

#### Список літератури:

1. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Львів, видавництво «Бескид Біт» 2003.
2. Індикатор годинникового типу. URL: <https://buklib.net/books/36002/>.
3. Важільно-зубчасті індикатори. URL: <https://storgom.ua/indikator...>
4. Прилади для вимірювання абсолютних лінійних деформацій URL <https://www.bing.com/search>
5. О.Г.Ушенко, Д.І.Житарюк Техніка лінійних вимірювань: метрологія та поліграфія .Навчальний посібник. 2021 Чернівці
6. Пружинні та пружинно-оптичні прилади. URL: [studfile.net](https://studfile.net) <https://studfile.net/preview>
7. Мікрокатори ІПІ і мікатори ІПП. URL: <http://standart-m.com.ua/>.
8. Вимірювальні головки. URL: <https://ni/biz/ua>
9. Адаменко Ю.І., Майданюк С.В., Мініцька Н.В., Плівак О.А. Лінійні та кутові вимірювання. URL: [kpi.uahttps://ela.kpi.ua/bitstream](http://kpi.uahttps://ela.kpi.ua/bitstream)

10. Розміри, відхилення розмірів, допуски, якості точності. URL: <https://studfile.net/preview/5398872/page:2/>
11. ДСТУ ГОСТ 577:2009 Індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Технічні умови.

**Pavlenko V.Ya. INDICATION TOOL AS A GUARANTEE OF QUALITY IN THE PRACTICE OF TECHNICAL CONTROL. METHODS AND MEANS OF MEASUREMENTS**

*The quality and, accordingly, the competitiveness of products are largely determined by the state of measuring equipment at the enterprise. The control of linear quantities is the most widespread field of measurements in science and technology – it is a component of technical measurements thanks to which the dimensions of parts and products or their individual elements are determined. Measuring equipment is an integral part of any production, because, depending on the specifics of production and design documentation, measurements are carried out in different ranges of values and with different accuracy. The article examines the features of indicator measuring tools, the problems of choosing tools and methods for controlling the geometric dimensions of parts and assembly units of accuracy classes (0 – 12) of qualities, as well as measurements in hard-to-reach places (outer and inner diameters, hole depths, thread parameters, gear couplings, parallelism of planes, etc.). It is stated that when choosing a measuring instrument, the size of the part or product, the method and conditions of measurement, the quality (accuracy class) of the measured product, and the permissible error of the measuring instrument are taken into account. The types of indicators are analyzed, each area of their application is explained, the expediency of using one or another type of indicator is substantiated, recommendations are given for choosing a measuring instrument depending on the conditions of the design documentation, the technological process and the design of the product.*

**Key words:** measuring tools, measuring instrument, control methods, indicators, measurement error.



# АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

UDC 629.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/04>**Rahulin S.V.**

Flight Academy of the National Aviation University

**Sharabaiko A.N.**

Flight Academy of the National Aviation University

**Lozovskyi V.G.**

Flight Academy of the National Aviation University

## OPTIMIZATION OF AIRCRAFT BEARING SURFACE BASED ON THE SOLUTION OF COUPLED EQUATIONS

The rational choice of bearing surfaces shapes is the main task when designing subsonic aircraft. The successful choice of the bearing surface shape to a great extent derivate the obtainment of high aerodynamic characteristics of the bearing surface and the vehicle as a whole.

Nowadays methods of aerodynamic design can be divided into experimental and numerical. Experimental methods are based on the results of numerous experiments and the obtained experience of the researcher. This approach is a high cost one, time consuming and does not guarantee an ultimate towards the solution of aerodynamic design problems. Numerous methods are based on the use of the mathematical tool of fluid mechanics and make it possible to define the optimal shape for a given flow state. These methods are at a low cost, faster and permit to find the optimal solution.

The research investigates the task of optimizing bearing surfaces for a stationary incompressible viscous fluid flow, which is characterized by average according to Reynolds – Navier-Stokes equations.

Nowadays numerical methods of aerodynamic design can be divided into two groups: inverse methods and optimization methods.

Inverse methods make it possible to define the aerodynamic shape for a given pressure or velocity distribution.

Unlike inverse methods, numerous optimization methods do not require a specific pressure or velocity field and can be formulated for a wide range of aerodynamic design problems. They can be divided into two groups: without gradient and gradient methods.

The most effective in the group of gradient methods is the method based on the solution of coupled equations. It allows to calculate the gradient by means of singelfold solved direct problems and coupled equations. Meanwhile, the time spent on calculating the gradient does not independent of the number of design variables.

**Key words:** method, solution of coupled equations, reference, gradient, optimization, bearing surface.

**Statement of the task.** Functional limitations  $R(w,s)$  is the Navier-Stokes equation for a two-dimensional stationary incompressible viscous flow. Let's mark cartesian reference as  $x_1, x_2$ , and the components of the velocity vector  $-u_1, u_2$ , we will also consider a summation for indices which are repeated  $i(i=1,2)$ . Then the Navier-Stokes equations can be represented as follows:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_i} - \frac{\partial f_i^v}{\partial x_i} = 0 \quad (1.1)$$

where

$$f_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ pu_i u_1 + p\delta_{i1} \\ pu_i u_2 + p\delta_{i2} \end{Bmatrix}, \quad f_i^v = \begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_{ij}\delta_{j1} \\ \sigma_{ij}\delta_{j2} \end{Bmatrix}, \quad (1.2)$$

$$\sigma_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (1.3)$$

$p$  – pressure;  $\rho$  – density;  $\mu$  – dynamic viscosity.

A vector is taken as the variable flow field  $w(s)$ :

$$w = \begin{Bmatrix} p \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}. \quad (1.4)$$

For further derivation of the coupled equations, the vector equation (1.1) must be represented in the computational space with the reference  $\xi_1, \xi_2$  such that the contour of the body which is investigated lies on the axis  $\xi_1$  (Fig. 1).

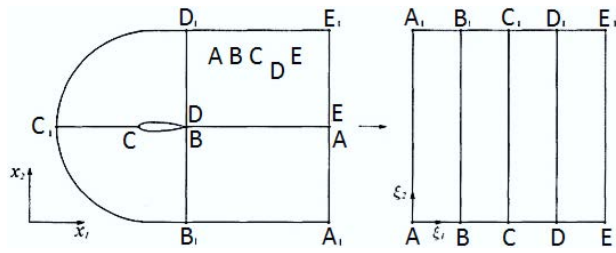


Fig. 1. Physical and computing areas

In order to represent the Navier-Stokes equations in the computational coordinate system, we have the following correlations:

$$x_i = x_i(\xi_1, \xi_2); \xi_i = \xi_i(x_1, x_2);$$

$$\begin{cases} dx_1 = \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} d\xi_1 + \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} d\xi_2 \\ dx_2 = \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} d\xi_1 + \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} d\xi_2 \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} d\xi_1 = \frac{\partial \xi_1}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial \xi_1}{\partial x_2} dx_2 \\ d\xi_2 = \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial \xi_2}{\partial x_2} dx_2 \end{cases} \quad (1.6)$$

Let's solve the system (2.5) regarding  $d\xi_1$ ,  $d\xi_2$ , then we will obtain

$$\begin{cases} d\xi_1 J = \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} dx_1 + \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} dx_2 \\ d\xi_2 J = -\frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} dx_1 + \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} dx_2 \end{cases} \quad (1.7)$$

where  $J$  – transition is determined according to formula

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} & \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} & \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} \end{vmatrix} = \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} \quad (1.8)$$

On the basis of correlations (1.6) and (1.7) we obtain

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi_1}{\partial x_1} J &= \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2}; & \frac{\partial \xi_1}{\partial x_2} J &= -\frac{\partial x_1}{\partial \xi_2}; \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} J &= \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1}; & \frac{\partial \xi_2}{\partial x_2} J &= \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Equation (1.1) can be putted down in the computational reference as follows

$$\frac{\partial f_i}{\partial \xi_j} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} - \frac{\partial f_i^v}{\partial \xi_j} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} = 0. \quad (1.10)$$

Multiply equation (1.10) by  $J$  and use correlation (1.9), then we will obtain

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_1}{\partial \xi_1} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial f_1}{\partial \xi_2} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} - \frac{\partial f_2}{\partial \xi_1} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial f_2}{\partial \xi_2} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} - \\ & - \left( \frac{\partial f_1^v}{\partial \xi_1} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial f_1^v}{\partial \xi_2} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} - \frac{\partial f_2^v}{\partial \xi_1} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial f_2^v}{\partial \xi_2} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} \right) = 0, \end{aligned}$$

or

$$\frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} - i \frac{\partial F_i^v}{\partial \xi_i} = 0, \quad (1.11)$$

$F_i = S_{ij} f_j$  – convective flow;  
 $F_i^v = S_{ij}^v f_j$  – diffusion flow;

$$F_i = \begin{Bmatrix} S_{ij} u_j \\ S_{ij} \rho u_j u_j + S_{i1} \rho \\ S_{ij} \rho u_j u_j + S_{i2} \rho \end{Bmatrix}, \quad F_i^v = \begin{Bmatrix} 0 \\ S_{ij} \sigma_{j1} \\ S_{ij} \sigma_{j2} \end{Bmatrix}, \quad (1.12)$$

$$S = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} & -\frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} \\ -\frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} & \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} \end{pmatrix}. \quad (1.13)$$

Thus, the constraint functions can be written as

$$R = \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} - \frac{\partial F_i^v}{\partial \xi_i} = 0. \quad (1.14)$$

We will obtain a variation of the constraint functions  $\delta R(w, s)$ . According to the fact that in the computational space the shape of the body and, accordingly, the area  $D_\xi$  remain unchanged with variations of the shape in physical space, then for any point of the computational area  $D_\xi$  can be put as follows:

$$\delta R = R(w + \delta w, s + \delta s) - R(w, s) =$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial F_i(w + \delta w, s + \delta s)}{\partial \xi_i} - \frac{\partial F_i^v(w + \delta w, s + \delta s)}{\partial \xi_i} - \left( \frac{\partial F_i(w, s)}{\partial \xi_i} - \frac{\partial F_i^v(w, s)}{\partial \xi_i} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi_i} (F_i(w + \delta w, s + \delta s) - F_i(w, s)) - \frac{\partial}{\partial \xi_i} (F_i^v(w + \delta w, s + \delta s) - F_i^v(w, s)) = 0, \end{aligned}$$

or

$$\delta R = \frac{\partial (\delta F_i)}{\partial \xi_i} - \frac{\partial (\delta F_i^v)}{\partial \xi_i} = 0. \quad (1.15)$$

Let's put down the variations of flows as follows

$$\delta F_i = \delta F_{iI} + \delta F_{iII}, \delta F_i^v = \delta F_{iI}^v + \delta F_{iII}^v, \quad (1.16)$$

where the variations with the index  $I$  are the contributions related to the change of the variables of the flow field  $\delta w$ , and with an index  $II$  – contributions related to the change in body shape  $\delta s$ .

Let's consider objective functional  $I$ , which can be represented as an integral outside the margin  $B_{\xi_w}$

$$I = \int_{B_{\xi_w}} M(w, s) dB_\xi, \quad (1.17)$$

where  $B_{\xi_w}$  – body contour in computing space;

$M(w, s)$  – subintegral function of cost functional. The type of the subintegral function depends on the particular formulation of the optimization task. The expression for the variation of the cost functional can be represented as follows:

$$\delta I = \int_{B_{\xi_w}} \delta M dB_\xi. \quad (1.18)$$

We multiply equation (1.15) by the vector of Lagrange multipliers at each point of the area and integrate along it, as a result we obtain:

$$\int_{D_\xi} \Psi^T \frac{\partial}{\partial \xi_i} (\delta F_i - \delta F_i^v) dD_\xi = 0, \quad (1.19)$$

where

$$dD_\xi = d\xi_1 d\xi_2$$

Let's assume that the function  $\psi$  is continuous and differentiable, then integrating the expression (1.19) by parts and applying the Gauss theorem, we have

$$\begin{aligned} & \int_{D_\xi} \Psi^T \frac{\partial}{\partial \xi_i} (\delta F_i - \delta F_i^v) dD_\xi = \\ & = \int_{B_{\xi_w}} n_i^s \Psi^T (\delta F_i - \delta F_i^v) dB_\xi - \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\delta F_i - \delta F_i^v) dD_\xi = 0, \quad (1.20) \end{aligned}$$

Since the expression (1.20) is equals zero, it can be subtracted from the expression for the variation of the cost functional (1.18) and obtain

$$\delta I = \int_{B_{\xi_w}} \delta M dB_\xi - \int_{B_{\xi_w}} n_i^s \Psi^T (\delta F_i - \delta F_i^v) dB_\xi + \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\delta F_i - \delta F_i^v) dD_\xi.$$

Based on the assumption that at the outer boundary of the area of flows variation which is considered, as a result of the change in the shape of the body equal zero, can be shown as follows:

$$\delta I = \int_{B_{\xi_w}} [\delta M - n_i^s \Psi^T (\delta F_i - \delta F_i^v)] dB_\xi + \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\delta F_i - \delta F_i^v) dD_\xi.$$

Going forward, the following representation of the variation of the cost functional will be more convenient

$$\begin{aligned} \delta I = & \int_{B_{\xi_w}} [\delta M - n_i^s \Psi^T (\delta F_i - \delta F_i^v)] dB_\xi + \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\delta F_{ii} - \delta F_{ii}^v) dD_\xi + \\ & \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\delta F_{iii} - \delta F_{iii}^v) dD_\xi. \quad (1.21) \end{aligned}$$

It is necessary to find such functions  $\psi$ , that the first two integrals of expression (1.21) became zero. Let's transform the second integral of expression (1.21)

$$\int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\delta F_{ii} - \delta F_{ii}^v) dD_\xi = \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \delta F_{ii} dD_\xi - \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \delta F_{ii}^v dD_\xi. \quad (1.22)$$

Let's examine the first integral on the right side of the expression (1.22). According to the correlation (1.12), we state

$$\delta F_i = \delta (S_{ij} f_j) = \delta S_{ij} f_j + S_{ij} \delta f_j,$$

because at each point in the computational space

$$D_\xi f_j = f_j(w),$$

then

$$\delta f_j = \frac{\partial f_j}{\partial w} \delta w, \text{ that's why } F_{ii} = S_{ij} \frac{\partial f_j}{\partial w} \delta w; \quad \delta F_{iii} = \delta S_{ij} f_j, \quad (1.23)$$

where

$$\delta w = \begin{pmatrix} \delta p \\ \delta u_1 \\ \delta u_2 \end{pmatrix}. \quad (1.24)$$

Let's define the components of vector  $\delta F_{ii}$ . According to the correlation (1.12), we state

$$\delta F_i = \left\{ \begin{array}{l} S_{i1} \delta u_1 + S_{i2} \delta u_2 \\ S_{i1} (2\rho u_1 \delta u_1 + \delta \rho) + S_{i2} (\rho u_2 \delta u_1 + \rho u_1 \delta u_2) \\ S_{i1} (\rho u_2 \delta u_1 + \rho u_1 \delta u_2) + S_{i2} (2\rho u_2 \delta u_2 + \delta \rho) \end{array} \right\}, \quad (1.25)$$

then the first integral on the right side of the expression (2.22) can be represented as follows

$$\begin{aligned} & \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \delta F_{ii} dD_\xi = \int_{D_\xi} \left( \frac{\partial \Psi_2}{\partial \xi_i} S_{i1} + \frac{\partial \Psi_3}{\partial \xi_i} S_{i2} \right) \delta \rho dD_\xi + \\ & + \int_{D_\xi} \left[ \frac{\partial \Psi_1}{\partial \xi_i} S_{i1} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial \xi_i} (S_{i1} 2\rho u_1 + S_{i2} \rho u_2) + \frac{\partial \Psi_3}{\partial \xi_i} S_{i1} \rho u_2 \right] \delta u_1 dD_\xi + \\ & + \int_{D_\xi} \left[ \frac{\partial \Psi_1}{\partial \xi_i} S_{i2} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial \xi_i} S_{i2} \rho u_1 + \frac{\partial \Psi_3}{\partial \xi_i} (S_{i1} \rho u_1 + S_{i2} 2\rho u_2) \right] \delta u_2 dD_\xi. \quad (1.26) \end{aligned}$$

Let's consider the second integral on the right side of the expression (1.22)

$$- \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \delta F_{ii}^v dD_\xi.$$

Let's determine the contribution from the viscous terms of the equations of motion to the coupled equations

$$- \int_{D_\xi} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} (\delta S_{ij} \sigma_{kj} + S_{ij} \delta \sigma_{kj}) dD_\xi,$$

where

$$\sigma_{kj} = \mu \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right).$$

The velocity derivatives can be represented as

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial u_i}{\partial \xi_l} \frac{\partial \xi_l}{\partial x_j} = \frac{S_{lj}}{J} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_l}.$$

Then for variation of stress, we obtain

$$\delta \sigma_{kj} = \mu \left( \frac{S_{lj}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_l} \delta u_k + \frac{S_{lk}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_l} \delta u_j \right) + \mu \left( \delta \left( \frac{S_{lj}}{J} \right) \frac{\partial u_k}{\partial \xi_l} + \delta \left( \frac{S_{lk}}{J} \right) \frac{\partial u_j}{\partial \xi_l} \right),$$

or

$$\delta \sigma_{kj} = \delta \sigma_{kj}^I + \delta \sigma_{kj}^{II}, \quad (1.27)$$

where

$$\delta \sigma_{kj}^I = \mu \left( \frac{S_{lj}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_l} \delta u_k + \frac{S_{lk}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_l} \delta u_j \right);$$

$$\delta \sigma_{kj}^{II} = \mu \left( \delta \left( \frac{S_{lj}}{J} \right) \frac{\partial u_k}{\partial \xi_l} + \delta \left( \frac{S_{lk}}{J} \right) \frac{\partial u_j}{\partial \xi_l} \right). \quad (1.28)$$

Thus, it can be represented as follows:

$$\delta F_{ii}^{v1} = 0; \quad \delta F_{iii}^{v1} = 0;$$

$$\delta F_{ii}^{v2} = S_{ij} \delta \sigma_{ij}^I; \quad \delta F_{iii}^{v2} = \delta S_{ij} \sigma_{ij}^I + S_{ij} \delta \sigma_{ij}^{II};$$

$$\delta F_{ii}^{v3} = S_{ij} \delta \sigma_{ij}^I; \quad \delta F_{iii}^{v3} = \delta S_{ij} \sigma_{ij}^I + S_{ij} \delta \sigma_{ij}^{II}; \quad (1.29)$$

Taking into consideration, the obtained correlations, the contribution from the viscous terms of the equations of motion to the coupled equations is represented as

$$- \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \delta F_{ii}^v dD_\xi = - \int_{D_\xi} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} S_{ij} \mu \left( \frac{S_{lj}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_l} \delta u_k + \frac{S_{lk}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_l} \delta u_j \right) dD_\xi. \quad (1.30)$$

Integrating the expression (1.30) by parts and using the Ostrogradsky-Gauss theorem, we obtain

$$\begin{aligned} & - \int_{D_\xi} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} S_{ij} \mu \left( \frac{S_{ij}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \delta u_k + \frac{S_{ik}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \delta u_j \right) dD_\xi = \\ & = - \int_{B_\xi} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} n_i^\xi S_{ij} \mu \left( \frac{S_{ij}}{J} \delta u_k + \frac{S_{ik}}{J} \delta u_j \right) dB_\xi + \\ & + \int_{D_\xi} \delta u_k \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ S_{ij} S_{ij} \frac{\mu}{J} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} \right] dD_\xi + \int_{D_\xi} \delta u_j \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ S_{ij} S_{ik} \frac{\mu}{J} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} \right] dD_\xi. \end{aligned}$$

We consider that the integral along the boundary becomes zero, since the variations  $\delta u_k=0$  on the boundary. Also, replacing the corresponding indices in the last two integrals, we have

$$- \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \delta F_{ii} dD_\xi = \int_{D_\xi} \delta u_k \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[ S_{ij} \mu \left( \frac{S_{ij}}{J} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} + \frac{S_{ik}}{J} \frac{\partial \Phi_j}{\partial \xi_i} \right) \right] dD_\xi$$

We will note that

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{ij}}{\partial \xi_i} &= 0 \\ \frac{S_{ij}}{J} \frac{\partial \Phi_k}{\partial \xi_i} &= \frac{\partial \Phi_k}{\partial x_j}, \end{aligned}$$

then we will get

$$- \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \delta F_{ii} dD_\xi = \int_{D_\xi} \delta u_k \left[ S_{ij} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( \mu \left( \frac{\partial \Phi_k}{\partial x_j} + \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_k} \right) \right) \right] dD_\xi.$$

The obtained coupled equations do not depend on the form of the objective functional and can be used to solve volitional two-dimensional problems of optimizing aerodynamic shapes for an uncompressed stationary viscous fluid flow.

### Main material presenting

To solve the coupled equations, it is necessary to set boundary conditions which can be obtained from the first integral of the expression (1.21)

$$\int_{B_w} \left[ \delta M - n_i^\xi \Psi^T (\delta F_i - \delta F_i^v) \right] dB_\xi. \quad (1.31)$$

As an example, let's consider three different cost functionals and will obtain from expression (2.31) the corresponding boundary conditions for the coupled equations.

Let's assume that the cost functional will be the resultant force vector acting on the bearing surface, projected in a certain direction

$$I = X_a q_1 + Y_a q_2 = q_1 \int_{B_w} n_j (\delta_{j1} p - \sigma_{j1}) dB + q_2 \int_{B_w} n_j (\delta_{j2} p - \sigma_{j2}) dB, \quad (1.32)$$

where

$B_w$  – contour of the body in physical space;

$n_j$  – vector of the normal towards the element  $dB$  in physical space.

Let's imagine the expression (1.32) as an integral along the boundary in the computational space. The

normal vector  $n$  towards the contour of the body can be represented as

$$\begin{aligned} \bar{n} &= \frac{\frac{\partial \bar{r}}{\partial \xi_1} \times \bar{k}}{\left| \frac{\partial \bar{r}}{\partial \xi_1} \times \bar{k} \right|} = \frac{\bar{i} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} - \bar{j} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1}}{\sqrt{\left( \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} \right)^2}} = - \frac{\bar{i} S_{21} + \bar{j} S_{22}}{|S_2|}, \text{ тобто} \\ n_j &= - \frac{S_{2j}}{|S_2|}, \text{ де } |S_2| = \sqrt{S_{2j} S_{2j}}. \end{aligned}$$

The element  $dB$  can be represented as

$$dB = \left| \frac{\partial \bar{r}}{\partial \xi_1} d\xi_1 \times \bar{k} \right| = \left| \frac{\partial \bar{r}}{\partial \xi_1} \times \bar{k} \right| d\xi_1 = |S_2| d\xi_1.$$

Thus, the cost functional can be written as

$$I = q_1 \int_{B_w} S_{2j} (\delta_{j1} p - \sigma_{j1}) d\xi_1 - q_2 \int_{B_w} S_{2j} (\delta_{j2} p - \sigma_{j2}) d\xi_1. \quad (1.33)$$

According to the expression (1.17)

$$M(w, s) = -q_1 S_{2j} (\delta_{j1} p - \sigma_{j1}) - q_2 S_{2j} (\delta_{j2} p - \sigma_{j2}); dB_\xi = d\xi_1. \quad (1.34)$$

Expression (1.31) can be represented in the form

$$\begin{aligned} \int_{B_w} \left[ \delta M - n_i^\xi \Psi^T (\delta F_i - F_i^v) \right] dB_\xi &= \int_{B_w} \left[ \delta M - \Psi^T \delta (F_2 - F_2^v) \right] d\xi_1 = \\ &= - \int_{B_w} q_1 \delta (S_{21} p - S_{2j} \sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_w} q_2 \delta (S_{22} p - S_{2j} \sigma_{j2}) d\xi_1 + \\ &+ \int_{B_w} \Psi_1 \delta (s_{2j} p u_j) d\xi_1 + \int_{B_w} \Psi_2 \delta (S_{2j} p u_j u_1 + S_{21} p - S_{2j} \sigma_{j1}) d\xi_1 + \\ &+ \int_{B_w} \Psi_3 \delta (S_{2j} p u_j u_2 + S_{22} p - S_{2j} \sigma_{j2}) d\xi_1. \end{aligned}$$

Let's consider the boundary conditions for the fluid motion equations  $u_i=0$ , then we will obtain

$$\begin{aligned} \int_{B_w} \left[ \delta M + \Psi^T \delta (F_2 - F_2^v) \right] d\xi_1 &= \\ &- \int_{B_w} q_1 \delta (S_{21} p - S_{2j} \sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_w} q_2 \delta (S_{22} p - S_{2j} \sigma_{j2}) d\xi_1 + \quad (1.35) \\ &+ \int_{B_w} \Psi_2 \delta (S_{21} p - S_{2j} \sigma_{j1}) d\xi_1 + \int_{B_w} \Psi_3 \delta (S_{22} p - S_{2j} \sigma_{j2}) d\xi_1. \end{aligned}$$

Upon solving the system of coupled differential equations with the obtained boundary conditions, the variation of the cost functional can be calculated as

$$\delta I = \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\delta F_{iii} - \delta F_{iii}^v) dD_\xi. \quad (1.36)$$

Variation of flows can be represented as below

$$\delta F_{iii} = \frac{\partial F_i}{\partial s} \delta s; \delta F_{iii}^v = \frac{\partial F_i^v}{\partial s} \delta s.$$

Then the expression (1.36) can be given the form

$$\delta I = \int_{D_\xi} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} \left( \frac{\partial F_i}{\partial s} - \frac{\partial F_i^v}{\partial s} \right) \delta s dD_\xi$$

Let's consider how the next task of optimization maximizes the aerodynamic quality of the bearing surface, i.e. the cost functionality

$$I = -\frac{Y_a}{X_a}$$

Let's write down a variation of this functional:

$$\delta I = \delta \left( -\frac{Y_a}{X_a} \right) = -\frac{1}{X_a} \delta Y_a + \frac{Y_a}{X_a^2} \delta X_a =$$

$$= -\frac{Y_a}{X_a^2} \int_{B_{\xi_w}} \delta (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 + \frac{1}{X_a} \int_{B_{\xi_w}} \delta (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1.$$

According to expression (1.31), we obtain

$$\int_{B_{\xi_w}} [\delta M - n_i^{\xi} \psi^T (\delta F_i - \delta F_i^v)] dB_{\xi} =$$

$$= -\int_{B_{\xi_w}} \frac{Y_a}{X_a^2} \delta (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 + \int_{B_{\xi_w}} \frac{1}{X_a} \delta (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1 +$$

$$+ \int_{B_{\xi_w}} \psi_2 \delta (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 + \int_{B_{\xi_w}} \psi_{w3} \delta (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1.$$

From this equation can be seen, that if we accept

$$\psi_2 = \frac{Y_a}{X_a^2}, \psi_3 = -\frac{1}{X_a}$$

on the boundary of the object, then the integral which is considered will turn to zero. As in the previous problem, the multiplier  $\psi_1$  on the boundary of the object and multipliers  $\psi_1, \psi_2$  і  $\psi_3$  on the outer boundary can be chosen randomly. Having solved the coupled equations with the obtained boundary conditions, the variation of the cost functional can be calculated by formula (1.36).

As an example, let's consider another definition of the profile optimization problem. It is necessary to minimize the module of the aerodynamic moment  $|M_z|$ , current on the profile with respect to the point with coordinates  $(x_0, y_0)$ . The corresponding cost functional can be represented as follows

$$I = \frac{1}{2} M_z^2 = \frac{1}{2} \left[ \int_{B_a} (x - x_0) n_j (\delta_{j2}\sigma_{j2}) dB - \int_{B_a} (y - y_0) n_j (\delta_{j1}p - \sigma_{j1}) dB \right]^2 =$$

$$\frac{1}{2} \left[ \int_{B_{\xi_w}} (y - y_0) S_{2j} (\delta_{j1}p - \sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_{\xi_w}} (x - x_0) S_{2j} (\delta_{j2}p - \sigma_{j2}) d\xi_1 \right]^2.$$

### Bibliography:

1. Hicks, R.M. Wing design by numerical optimization / R.M. Hicks, P.A. Henne. *Journal of Aircraft*. 1978. v. 15. № 7. P. 407-412.
2. Lee, D.S. Robust evolutionary algorithms for UAV UCAV aerodynamic and RCS design optimisation / D.S. Lee, L.F. Gonzalez, K. Srinivas. *Computers & Fluids*. 2008. v. 37. P. 547-564.
3. Smith A.M.O., Hess J.L. Calculation of the Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three – Dimensional Bodies // Douglas report E.S.40622, 1962.
4. Rogers Stuart E. Progress in high-lift aerodynamic calculations. *J. Aircraft*. 1994. 31. № 6. P. 1244-1251.

### Рагулін С.В., Шарбайко О.М., Лозовський В.Г. ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПРОФІЛІВ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПОВ'ЯЗАНИХ РІВНЯНЬ

При проектуванні дозвукових літаків важливим завданням є раціональний вибір форм несучих поверхонь. Вдалий вибір форми несучої поверхні, значною мірою обумовлює отримання високих аеродинамічних характеристик несучої поверхні і апарату в цілому.

Let's write the variation of the cost functional as

$$\delta I = M_z \left[ \int_{B_{\xi_w}} (y - y_0) \delta (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_{\xi_w}} (x - x_0) \delta (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1 \right] +$$

$$+ M_z \left[ \int_{B_{\xi_w}} \delta y (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_{\xi_w}} \delta x (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1 \right].$$

From expression (1.31) we obtain

$$\int_{B_{\xi_w}} [\delta M - n_i^{\xi} \psi^T (\delta F_i - \delta F_i^v)] dB_{\xi} =$$

$$= \int_{B_{\xi_w}} M_z (y - y_0) \delta (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_{\xi_w}} M_z (x - x_0) \delta (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1 +$$

$$+ \int_{B_{\xi_w}} \psi_2 \delta (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 + \int_{B_{\xi_w}} \psi_3 \delta (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1 +$$

$$+ M_z \left[ \int_{B_{\xi_w}} \delta y (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_{\xi_w}} \delta x (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1 \right].$$

The same as in the previous task, multiplier  $\psi_1$  on the boundary of the object and multipliers  $\psi_1, \psi_2$  and  $\psi_3$  on the outer boundary can be chosen randomly. Having solved the coupled equations with the obtained boundary conditions, the variation of the cost functional can be calculated via formula

$$\delta I = \int_{B_{\xi}} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \xi_i} (\partial F_{iii} - \partial F_{iii}^v) dB_{\xi} +$$

$$+ M_z \left[ \int_{B_{\xi_w}} \delta y (S_{21}p - S_{2j}\sigma_{j1}) d\xi_1 - \int_{B_{\xi_w}} \delta x (S_{22}p - S_{2j}\sigma_{j2}) d\xi_1 \right].$$

**Conclusions.** Numerous optimization methods, together with methods of computational hydro aerodynamics, make it possible to find such an aerodynamic shape that delivers a minimum of the cost functionality under given functional limitations. Cost functionality can be drag, aerodynamic quality, pressure ratio. Different types of aerodynamic or geometrical limitations can act as functional limitations, such as given lifting force, volume or area of the object that is needed to be optimized.

The boundary conditions of the coupled equations can be obtained for many other tasks of bearing surfaces optimization.

Сучасні методи аеродинамічного проектування можна поділити на експериментальні та чисельні. Експериментальні методи спираються на результати численних експериментів та досвід дослідника. Цей підхід є дорогим, витратним за часом та не гарантує отримання оптимального розв'язання задач аеродинамічного проектування. Численні методи засновані на використанні математичного апарату механіки рідини та газу та дозволяють визначити оптимальну форму для заданого режиму течії. Ці методи є дешевшими, швидкими і дозволяють знаходити оптимальне рішення.

У роботі розглядається завдання оптимізації аеродинамічних профілів для стаціонарної нестискаємої в'язкої течії рідини, що описується середніми по Рейнольдсу рівняннями Нав'є-Стокса.

Сучасні чисельні методи аеродинамічного проектування можна поділити на дві групи: зворотні методи та прямі методи оптимізації.

Зворотні методи дозволяють знайти аеродинамічну форму за заданим розподілом тиску або швидкості.

На відміну від зворотних методів, чисельні методи оптимізації не вимагають певного поля тиску або швидкості і можуть бути сформульовані для широкого класу аеродинамічних завдань проектування. Їх можна поділити на дві групи: безградієнтні та градієнтні методи.

Найбільш ефективним у групі градієнтних методів є метод на основі розв'язання пов'язаних рівнянь. Він дозволяє обчислити градієнт за допомогою одноразово вирішених прямих завдань і пов'язаних рівнянь. При цьому час, що витрачається на обчислення градієнта, практично не залежить від кількості проектних змінних.

**Ключові слова:** метод, розв'язання пов'язаних рівнянь, система координат, градієнт, оптимізація, аеродинамічний профіль.

УДК 621.43.056

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/05>**Бстін Ю.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Абдулін М.З.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТОПКОВИХ ПРОЦЕСІВ У НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕЧАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

У роботі представлені результати дослідження енергоефективності та екологічності топкового процесу у промисловій низькотемпературній кондитерській печі малої потужності при використанні пального пристрою вихрового типу, що працює в імпульсному режимі. Вимірювання проводилися у трьох технологічних робочих режимах, регламентованих технологічними вимогами до випікання kek-сів: від 180°C до 220°C.

Досліджено проблему температурної нерівномірності у топковому просторі, що призводить до значного відсотка браку готової продукції, і зрештою – недоотримання кондитерськими фабриками певної частини прибутку. Температурна нерівномірність також суттєво позначається на стані обладнання та протязі його міжремонтного періоду.

На підставі проведених досліджень, зроблено висновок, що всі перелічені в статті проблеми пов'язані в першу чергу з вузьким діапазоном роботи пальника з закруткою потоку окислювача, який є недостатнім для втримання вимог технологічного процесу печі, що був досліджений.

**Ключові слова:** топкові процеси, низькотемпературні печі, економічність, екологічність, імпульсний режим, температурна нерівномірність.

**Постановка проблеми.** З метою захисту навколишнього середовища та зростання економічної безпеки виробничих підприємств, авторами статті були проведені дослідження енергоефективності та екологічності організації топкових процесів у промислових печах малої потужності, що працюють у діапазоні низьких температур. В першу чергу це вогнетехнічні об'єкти харчової промисловості. Проблема енергозберігаючого виробництва заслуговує в умовах сучасної економіко-екологічної кризи особливої уваги. Потреби підприємств харчової промисловості в паливі та енергії безперервно зростають. Одним із основних фінансово-економічних показників підприємств харчової промисловості є рентабельність. Її величина залежить від таких об'єктивних факторів, як зростання ціни на сировину, зростання тарифів на енергоносії, необхідність технічної реконструкції виробництва та ін. Для успішного

функціонування в умовах конкурентної боротьби виробниче підприємство у своїй діяльності повинне орієнтуватися на потреби ринку та на реалізацію досягнень науково-технічної революції.

Для вогнетехнічних об'єктів, що генерують теплову енергію під час виробничих процесів на підприємствах усіх галузей економіки України, **встановлені відомі вимоги до палинкових систем, які мають на меті саме підвищення енерго-екологічної ефективності їх роботи.** А саме: універсальність, надійність, стійкість запалювання і стабілізація фронту горіння в широких робочих діапазонах навантажень, забезпечення сумішоутворення заданої інтенсивності, забезпечення повноти згоряння газу при мінімальному коефіцієнті надлишку повітря, ремонтпридатність, незначний термін проведення модернізації та окупності, зниження споживання газу за рахунок зменшення питомих витрат, що позначиться на зниженні собівартості продукції [1].

Водночас з ефективністю газоспалювання, питання захисту довкілля також набуває все більшої актуальності та пріоритетності. Однією з основних забруднюючих речовин атмосферного повітря є оксиди азоту. Відсутність в Україні установок азотоочищення на більшості підприємств, де у технологічному процесі утворюються відхідні гази, що містять оксиди азоту, призводить до значних викидів його в атмосферу. Під впливом введення нормативно-правових документів [2] євроінтеграційне спрямування розвитку України ставить задачу відповідності екологічним стандартам Європейського Союзу, у якому гранично допустимі концентрації викидів оксидів азоту та інших шкідливих компонентів у відхідних газах нормуються згідно Директиви 20.01/8.0/Є.С [3] про промислові викиди та впровадження технологій безвідходного виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день Україна не здатна відразу у повній мірі забезпечити відповідність актуальним світовим нормативам, так як парк енергетичного обладнання застарів і потребує фундаментальних робіт з модернізації та реконструкції. Вугілля тривалий час було стабільною основою паливно-енергетичного комплексу країни. Але продукти його згорання мають високу токсичність, до того ж, через військові дії на Донбасі, де розташовані найбільші запаси цього палива, видобуток дуже ускладнюється, вважають автори статті [4].

Відновлювана енергетика почала розвиватися та набирати потужності. З урахуванням даних фактів Україна опинилася в критичній ситуації, один із варіантів вирішення якої може бути газ. Тому багато розвинених країн орієнтуються на газ через його екологічність у порівнянні з іншими органічними паливами. В статті [5] наводиться приклад того, що в державних енергетичних стратегіях Німеччини та Китаю, де вугілля є основою енергетики, фігурує намір максимального заміщення цього палива у зв'язку з екологічними проблемами та пов'язаними з цим різким погіршенням умови життя.

На перший план, поряд з необхідністю технічної реконструкції, впровадженням європейських стандартів контролю якості, розробкою нових видів продуктів, найактуальнішими є дослідження з проблем зниження собівартості продукції й у першу чергу – економія палива та електроенергії, а також підвищення екологічності виробничих процесів.

Найбільш важливою з причин досліджень, що проводяться у галузі організації топкових процесів

у низькотемпературних печах малої потужності для кондитерської галузі харчової промисловості, є проблема температурної нерівномірності у топковому просторі, яка призводить до великого відсотку браку готової продукції, і зрештою - недоотримання кондитерськими фабриками певної частини прибутку. Також цей факт суттєво позначається на стані обладнання та тривалості часу його міжремонтного періоду.

Великі компанії-виробники кондитерських низькотемпературних печей, що працюють на газоподібному паливі, виділяють колосальні засоби для проведення науково-дослідної роботи, спрямованої на вдосконалення обладнання, що виробляється. Крім відомих міжнародних науково-дослідних центрів, до дослідницької роботи та проведення енергетичного аудиту в якості консультантів запрошуються науково-виробничі підприємства, які розробляють і впроваджують на практиці інноваційні технології для більш ефективної організації топкових процесів у промислових печах. Протягом більш ніж 20 років діяльність [6] українського науково-виробничого підприємства «Струменево-нішева технологія» (СНТ) у тісній співпраці з інститутом технічної теплофізики Національної академії наук України та Кафедрою теплової та альтернативної енергетики Інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету «КПІ імені Ігоря Сікорського», пов'язана з розробкою та впровадженням нових інноваційних технологій у галузі енергетики та охорони навколишнього середовища.

**Постановка завдання.** З метою визначення можливості підвищення рівня ефективності організації топкового процесу у низькотемпературних печах з виробництва кексів та вафель до науково-виробничого підприємства «Струменево-нішева технологія» звернулося керівництво компанії «HAAS FOOD EQUIPMENT GmbH» (Замовник), яка є однією з найбільших у світі виробників пекарських ліній для кондитерської галузі харчової промисловості, виробничі площі якої розташовані на п'яти континентах. При цьому обов'язковою умовою має бути досягнення максимально стабільного рівня температурної рівномірності з гарантованим дотриманням міжнародних норм екологічності, надійності та економічності роботи печі при використанні запропонованих варіантів підвищення ефективності.

За рішенням технічної ради компанії «HAAS FOOD EQUIPMENT GmbH», прийнятому після презентації струменево-нішевої технології та огляду діючого вогнетехнічного обладнання модернізованого



за допомогою даної інноваційної технології, у якості випробувальної бази була надана низькотемпературна піч для випічки кексів у спеціалізованому науково-дослідному центрі, розташованому на базі кондитерської фабрики HAAS-MEINCKE (Данія; Копенгаген) та штат австрійських фахівців з необхідною приладовою базою.

Для досягнення цілей дослідження було розроблено методологію вирішення поставлених завдань, яка передбачає:

- Оцінку діапазону регулювання штатного пального пристрою (ПП) у фіксованому часовому інтервалі на різних технологічних режимах роботи печі;

- Оцінку витрат та втрат паливного газу під час циклів роботи ПП у тому ж часовому діапазоні на різних технологічних режимах роботи печі;

- Визначення складу газів, що йдуть у циклах роботи ПП у тому ж часовому діапазоні з оцінкою тимчасових інтервалів наднормативних викидів на різних технологічних режимах роботи печі.

Для реалізації цієї методології були розроблені методики проведення перерахованих вище досліджень.

Треба додати що методики, що використовувались у наших дослідженнях, багато років розроблялися, апробувалися та вдосконалювалися у лабораторії горіння теплоенергетичного факультету Київського політехнічного інституту.

Для досягнення поставлених цілей було виконано наступне:

1. Проводилася зорова фіксація зривів та підпалів факела ПП у фіксованому часовому інтервалі;
2. Паралельно цьому проводилися вимірювання витрат газу на перерахованих вище режимах;
3. Фіксувалася температура газу та повітря;
4. На перерахованих вище режимах проводилися виміри складу продуктів згорання;
5. Для оцінки ефективності роботи печі і складання її теплового балансу було виміряно ряд узгоджених параметрів:

- Витрата газу на різних технологічних режимах роботи печі;

- Температура продуктів згорання на виході з печі;

- Температура холодного повітря на вході в піч;

- Температура повітря на вході рециркуляційного вентилятора;

- Температура повітря на вході модуля нагріву;

- Аналіз відпрацьованих газів: надлишку повітря, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> і температури відхідних газів до скидання в цю ж трубу відпрацьованого повітря з печі.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Основна частина низькотемпературної печі для випікання кексів спеціалізованого науково-дослідного центру на фабриці HAAS-MEINCKE – це нагрівальний модуль, в якому встановлений палинковий пристрій вихрового типу одного з провідних виробників палиників для вогнетехнічних об'єктів. Виробнича потужність даного палиника від 35 до 200 кВт. (дані надані фабрикою).

Необхідно відзначити, що при експлуатації вогнетехнічних об'єктів у всіх існуючих світових галузях промисловості, основна частка витрати природного газу припадає на наступні підвиди палинкових пристроїв, розділених за своїми конструктивними особливостями на такі основні типи:

- вихрові із закруткою потоку окислювача;
- з зоною зворотних струмів за тілом, яке є поганообтічним;
- з інжекцією паливом потоку окислювача;
- подові палиники.

Сучасні палинкові пристрої, вироблені виробниками в усьому світі, в основному використовують застарілий, на наш погляд, перший тип ПП, який не зазнав будь-яких серйозних, принципових конструкторських змін протягом ось уже більше 20 років – вихрові палинкові пристрої із закруткою потоку окислювача. Діапазон робочого регулювання цих палиників є недостатнім для виконання вимог технологічного процесу, тому що надвеликі витрати газу при включенні та виключенні ПП призводять до надвеликих втрат (до 20%) палива. Що недопустимо виходячи з інформації на початку даної статті.

Саме таким типам палиників, нажаль, найчастіше віддають перевагу такі відомі виробники як: WEISHAUPТ, RIELLO, DREIZLER, CUENOD і т.д. Конструкторські бюро даних компаній давно скоротили витрати на розробку нових, ефективніших способів спалювання, зробивши ставку на вирівнювання економічних та екологічних показників роботи своїх палиників за рахунок:

- організації очищення відпрацьованих газів дорогими фільтрами та не менш дорогого їх обслуговування;

- великих витрат на електроніку, що контролює та регулює роботу палиника в режимах, заданих умовами технологічного процесу.

Отже, нагрівальний модуль печі служить для підігріву повітря, що йде на технологічний процес (схема з проміжним теплоносієм). У часовому діапазоні, в якому проводилися вимірювання, ПП працював в імпульсному режимі. Системою управління була запрограмована витрата газу

в 12,3 м<sup>3</sup>/год і виставлена температура, відповідна технологічним вимогам на наступних режимах роботи печі: перший і другий режим 180°C; третій режим – 220°C. Підтримка температурного режиму здійснювалася в автоматичному режимі за рахунок частоти включень і повних відключень ПП. Фіксація і реєстрація температурного режиму відбувалася за допомогою автоматики печі.

У нагрівальний модуль дослідницької печі подається повітря, частково відібране рециркуляційним вентилятором з потоку відпрацьованого повітря після технологічного процесу в кількості 8000 м<sup>3</sup>/год. Крім того, на вхід нагрівального модуля подається атмосферне повітря для розбавлення рециркуляційного повітря і зниження його вологості в кількості до 750 м<sup>3</sup>/год. Частина відпрацьованого повітря, що залишилася, разом з димовими газами подається в трубу. Повітря, що йде на технологічний процес, підігрівається в нагрівальному модулі, огинаючи топку і димогарні труби, через які проходить продукти згоряння, які генеруються в топці.

Для оцінки ефективності роботи печі і складання її теплового балансу було виміряно ряд узгоджених параметрів:

- Витрата газу на різних технологічних режимах роботи печі;
- Температура продуктів згоряння на виході з печі;
- Температура холодного повітря на вході в піч;
- Температура повітря на вході рециркуляційного вентилятора;
- Температура повітря на вході модуля нагріву;
- Аналіз відпрацьованих газів: Надлишку повітря, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> і температури відхідних газів до скидання в цю ж трубу відпрацьованого повітря з печі.

Результати досліджень представлені в наступній діаграмі (рис. 1), що разом з обробкою та аналізом отриманих результатів були представлені у попередній статті [7], що була опублікована у томі 33 (72) № 5, 2022 цього видання.

#### Прилади та похибки вимірювання.

Топкові процеси це складна взаємодія аеродинаміки, хімічної кінетики та теплопередачі у топковому просторі. Тому приладова база повинна враховувати всі складові процесу.

#### Похибка визначення витрати палива

Дослідження витрати палива на печі виконувалося за допомогою штатного лічильника газу Elster Quantometer QA 16 25 G1. Похибки визначення витрати пального розраховувалися відповідно до паспортних характеристик приладу:

- При пропускній здатності Q<sub>max</sub> від 20% до 100% помилка становить +/- 1,5%;
- При пропускній здатності Q<sub>max</sub> від 10% до 20% помилка становить +/- 3%.

#### Похибка вимірювання емісійних характеристик

Дослідження емісійних характеристик кондитерської печі виконувалося за допомогою газоаналізатору Testo 330 – 2L. Таким чином, похибки визначення концентрацій оксидів вуглецю, азоту, а також вмісту кисню розраховуються у відповідності до паспортних характеристик приладу.

Похибка визначення CO в діапазоні значень до 8000 ppm становить від ±2 ppm від показів при роздільній здатності сенсору 1 ppm.

Похибка визначення NO<sub>x</sub> складає від ±2 ppm в діапазоні значень до 3000 ppm при роздільній здатності сенсору 1 ppm.

Похибка визначення вмісту O<sub>2</sub> в продуктах згоряння в діапазоні вимірювань 0...20% становить ±0,2% від показів при роздільній здатності сенсору 0,1%.

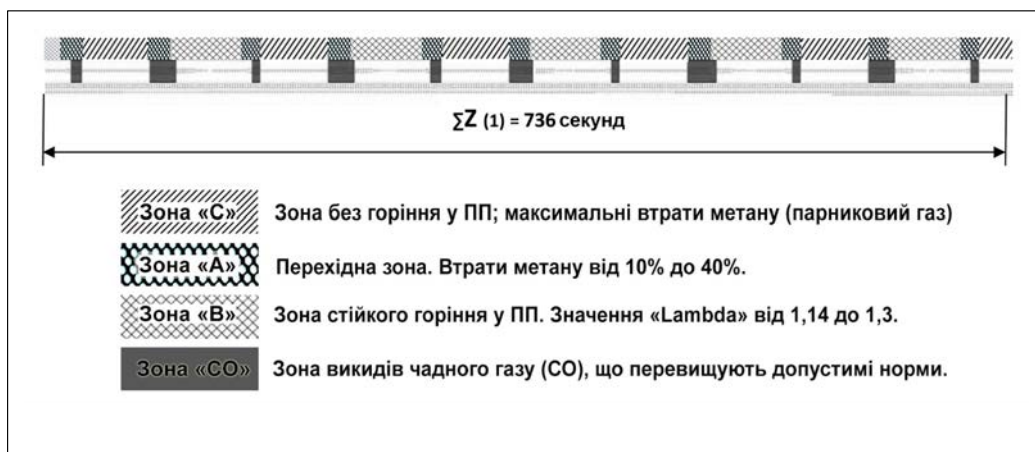


Рис. 1. Схема розподілу зон втрати метану та зон з наднормативними викидами CO

### Похибка вимірювання температурних характеристик

Дослідження температурних характеристик кондитерської печі (температура продуктів згоряння на виході з печі; температура холодного повітря на вході в піч; температура повітря на вході рециркуляційного вентилятора; температура повітря на вході модуля нагріву) виконувалося за допомогою штатних приладів, що входять до контрольно-вимірювального блоку печі. Також, згідно з нашою методикою, було розроблено методи вимірювання характеристик температурної рівномірності в топковому просторі.

**Висновки.** Пальник працює в режимі великого горіння протягом контрольованого проміжку часу і потім циклічно перемикається в режим малого горіння або повністю вимикається. Цей цикл повторюється в середньому раз в 2,5 хвилини і проміжок часу, коли пальник працює в режимі «великого» горіння, потім в режимі «малого» горіння або відключена, керується процесорним контролером.

Штатний ПП з закруткою потоку окислювача, що здійснює організацію топкового процесу кондитерської низькотемпературної печі, від самого початку не здатне генерувати низькі (до 300°C) температури, починає швидко набирати температуру. Досягши максимальної технологічної температури в топковому просторі, автоматика вогнетехнічного об'єкта відключає пальник і включає, коли датчики фіксують мінімально допустиму технологічну температуру. Включення та відключення ГУ відбувається з чітким часовим інтервалом. Тобто спостерігається імпульсний режим, при якому ПП, згідно з отриманими та обробленими результатами вимірювань, працює в режимі оптимального навантаження лише 40% вибіркового часового інтервалу.

Решту часу пальник працює або на часткових навантаженнях, що не є для неї економічними, або не працює зовсім. Але під час в інтервалі між погасанням факелу та перекриттям газоподаючого клапану через пальник в атмосферу їде

газ, який не підпалюється по причині відсутності факелу.

Це має такі наслідки:

- Через вузький діапазон стійкої роботи ПП, при його відключенні та включенні мають місце режими, коли газ подається до ПП в умовах відсутності факела. У разі спостерігається викид чистого метану в атмосферу.

- Крім того, враховуючи неможливість підтримки необхідного співвідношення газ-повітря на змінних режимах, включення та вимкнення ПП (перехід на режим і вихід з режиму) супроводжуються великими викидами СО та незгорілого метану.

- Крім того, часті, з великою амплітудою, температурні коливання в камері топки можуть призвести до передчасного зносу матеріалу камери в нагрівальному модулі.

- Проблеми з пульсацією температури, що зумовлена імпульсним режимом ПП, можуть мати місце також у робочому об'ємі печі. Це може призвести до порушень технологічного процесу та погіршення якості готової продукції.

- Безперервні включення та вимкнення автоматики, як правило, призводять до передчасного зношування елементів клапанів, перемикаючих пристроїв та інших елементів дорогої автоматики ГУ. Це обов'язково призведе до частих замін елементів автоматики та перманентного дорогого сервісного обслуговування.

Одна з головних функцій будь-якої системи керування горіння – це регулювання підведення тепла відповідно до потреб процесу. При імпульсному горінні підведення тепла регулюється модуляцією частоти включення в роботу пальника. Проблемним моментом в роботі даної низькотемпературної печі малої потужності може бути використання пальникового пристрою вихрового типу, що працює в імпульсному режимі. Тому всі перераховані вище проблеми пов'язані в першу чергу з вузьким діапазоном роботи пальникового пристрою з закруткою потоку окислювача, який є недостатнім для організації ефективного топкового процесу в низькотемпературних вогнетехнічних об'єктах малої потужності.

### **Список літератури:**

1. Громова О., Маркова Т. Доцільність використання екологічно чистих технологій енергозабезпечення на підприємствах харчової промисловості. Економіка харчової промисловості. 2010. С. 59–62.

2. ГКД 34.02.305-2002 Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=51507](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51507) (дата звернення: 23.01.2023).

3. Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2015/2193 від 25 листопада 2015 року про обмеження викидів у повітря певних забрудників від середніх спалювальних установок. Офіційний веб-портал парламенту України. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_022-15#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_022-15#Text) (дата звернення: 23.01.2023).

4. Справжня ціна вугілля в умовах війни на Донбасі: погляд крізь призму прав людини / Д. Казанський та ін. ; ред. А. Некрасова. Київ : ТОВ «АРТ КН.», 2017. 140 с.

5. Абдулін М., Горбань К., Сірий О. Взаємозв'язок робочого процесу пальникового пристрою на основі струменево-нішової технології спалювання газу з екологічними аспектами роботи вогнетехнічних об'єктів. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. № 1. С. 63–69.

6. Горбань К., Сірий О., Абдулін М. Можливості впливу струменево-нішової технології на екологічні та експлуатаційні параметри вогнетехнічного об'єкта. Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. Т. 2, № 6. С. 10–14.

7. Абдулін М., Бетін Ю. Особливості організації топкового процесу у печах малої потужності, що працюють в діапазоні низьких температур. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Т. 33(72), № 5. С. 199–204.

#### **Bietin Yu.O., Abdulin M.Z. STUDYING THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF ORGANIZING FURNACE PROCESSES IN LOW-TEMPERATURE LOW-CAPACITY FURNACES**

*The paper presents the results of research on energy efficiency and environmental friendliness of organization of the combustion process in an industrial low-temperature confectionary oven of small capacity using a swirl type burner operating in pulse mode.*

*The modern burners produced by the manufacturers in the whole world mostly use the vortex type burner with the swirling flow of oxidising agent, which in our opinion has not undergone any serious design changes for more than 20 years. The operating control range of these burners is not sufficient for low-temperature furnace processes because the start temperature, which these burners produce, is already higher than the temperature required by the process requirements. Therefore, these swirl burners must be operated in pulse mode in order to guarantee low-temperature combustion processes.*

*Measurements were taken in three operating modes regulated by the technological requirements for baking cakes: from 180°C to 220°C.*

*The problem of temperature irregularity in the furnace space, which leads to a high percentage of rejected finished products, and in the end - under-receipt by confectionery factories of a certain part of profit was investigated. Temperature irregularity also has a significant impact on the condition of the equipment and the length of its overhaul period.*

*Based on the research, it is concluded that all the problems listed in the article are primarily related to the narrow range of operation of the burner with a flow oxidizer swirl, which is insufficient for organizing an efficient furnace process in low-temperature fire facilities of low capacity.*

**Key words:** *furnace processes, low-temperature furnaces, economy, environmental friendliness, pulse mode, temperature irregularity.*

**Боянівський В.П.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ТЕПЛООБМІН ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ВСЕРЕДИНИ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИКІВ ІЗ ГЛАДКИМИ ТРУБАМИ

Горизонтально-плівкові випарники в якості основного теплообмінного обладнання мають широке застосування у холодильній техніці, теплових насосних установках, системах кондиціонування, підігрівниках енергетичних систем, випарниках термічних опріснювальних установок тощо.

Економічні та екологічні міркування продовжують стимулювати великий інтерес дослідників до підвищення ефективності енергетичних систем. У багатьох випадках це досягається за рахунок підвищення продуктивності теплообмінників. Для ефективного проектування плівкових випарників із спадаючою плівкою необхідні точні моделі розрахунків коефіцієнтів теплопередачі зі сторони гріючого середовища і рідини, що охолоджує. Неточність розрахунку може призвести до збільшення капітальних затрат на виробництво через збільшення габаритів апарату і як наслідок теплообмінник працюватиме в неоптимальних робочих параметрах.

У другій половині минулого століття в літературі були запропоновані численні моделі для прогнозування локальних коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації чистої насиченої пари всередині горизонтальних труб. Ці методи були лише частково успішними через обмеженість використовуваних баз даних та використання поганих або спрощених критеріїв переходу між режимами течії потоку.

Дана робота присвячена експериментальному дослідженню конденсації водяної пари всередині гладкої горизонтальної труби  $d_{\text{вн}} = 16$  мм в діапазоні параметрів величин: швидкість пари на вході в трубу  $w_{\text{вх}} = 16\text{--}64$  м/с, масовий паровміст  $x = 0,02\text{--}1,0$ , густина теплового потоку  $q = 3,8\text{--}253$  кВт/м<sup>2</sup>.

В статті проаналізовані наявні теоретичні, напівемпіричні та експериментальні моделі розрахунку теплообміну при конденсації водяної пари всередині горизонтальних труб.

Основними причинами розбіжності розрахункових кореляцій із експериментальними даними є: не показано вплив на теплообмін густини теплового потоку, масового паровмісту, швидкості парової фази; середні коефіцієнти тепловіддачі вимірювались по довжині труби при одночасному існуванні різних режимів течії; не враховувалося яка частина труби зайнята струмком конденсату. В області масового паровмісту  $0 < x < 1,0$  розрахункові залежності для визначення середніх коефіцієнтів тепловіддачі побудовані без врахування зміни режиму течії двухфазного потоку по довжині і периметру труби.

Відмічена відсутність достатньої кількості експериментальних досліджень при тиску  $P < 0,1$  МПа для області конденсації за умови співставного впливу сили тяжіння і сили тертя.

**Ключові слова:** водяна пара, плівкова конденсація, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, міжфазне тертя, режим течії, горизонтальна труба.

**Постановка проблеми.** Опріснення морської води стає все більш популярним для виробництва питної води в усьому світі, оскільки багато прибережних муніципалітетів і комунальних підприємств шукають надійні та захищені від посухи джерела нового місцевого водопостачання. За даними Міжнародної асоціації з опріснення, у червні 2018 року в усьому світі працювало понад 16 000 опріснювальних установок, які виробляли 87,5 мільйонів кубометрів води на добу та забезпечували водою 300 мільйонів людей [1].

Організація економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) передбачила, що до 2050 року доступність знизиться до 55%, а до кінця століття

40% населення світу житимуть у регіонах з нестачею води [2].

Вичерпний літературний огляд термічних методів опріснення можна знайти за посиланням [3]. Опріснення за допомогою багатоступеневого випаровування (MED) має суттєві переваги у порівнянні із іншими термічними методами опріснення. Такими перевагами є високий коефіцієнт теплопередачі, висока якість прісної води, можливість утилізувати низькопотенційну енергію [4]. Одним із основних елементів такої системи є горизонтально-трубний двухфазний теплообмінник (див. рис. 1). Теплообмінники характеризуються малими різницями температур,

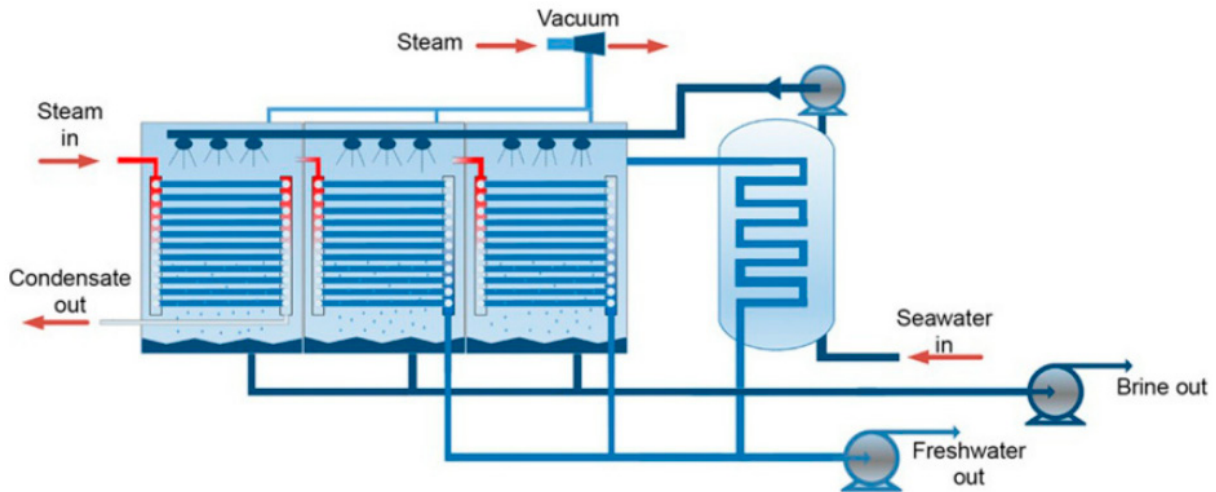


Рис. 1. Схематичне зображення процесу багатоступеневої дистиляції [5]

низьким гідравлічним опором і «чутливим» до змін термодинамічних параметрів робочим тілом. Відносно невеликі відхилення при розрахунку поверхні теплообміну можуть призвести до не виправданих економічних втрат.

Процеси теплообміну, що відбуваються в конденсаторах, істотно впливають на загальну енергоефективність зазначених систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Точне визначення коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації дуже важливо, особливо у випадках, коли значення тепловіддачі близьке до значень тепловіддачі зі сторони випаровування.

Одна [13] із перших робіт в якій наведені залежності для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії плівки на вертикальній плоскій поверхні при наявності та відсутності міжфазного тертя.

Для випадку, коли на процес конденсації переважуючий вплив має міжфазне тертя автори [15], [16] виконали теоретичні розрахунки коефіцієнтів тепловіддачі при турбулентній течії плівки конденсату.

В роботі [14] розробили напівемпіричну модель для розрахунку тепловіддачі при конденсації суміші пари і конденсату в трубі.

У 2015 р. Ріферт і Серєда опублікували оглядову статтю [11] про теоретичні та експериментальні дослідження конденсації в горизонтальних трубках. Серед іншого, тут цитуються численні оглядові публікації, хоча основна увага приділяється конденсації холодоагентів. У другій частині публікації [12] знову наведено кілька серій випробувань з водяною парою під атмосферним тиском.

В [6] показано (див. рис. 2), що експериментальні дані [7] при конденсації водяної пари для

ламінарної течії плівки конденсату мають розбіжність більше 100% у порівнянні із розрахунками за формулами із робіт [8–10].

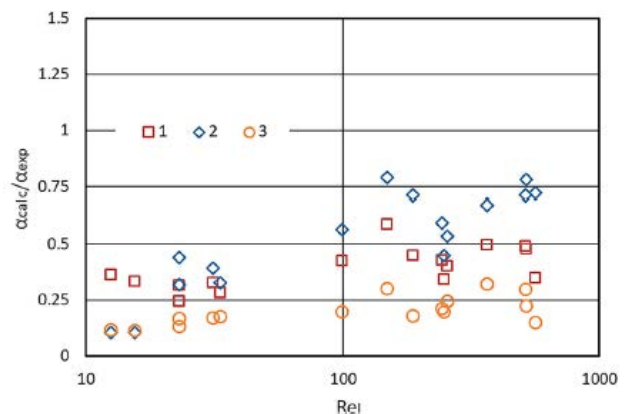


Рис. 2. Порівняння експериментальних даних [7] із залежностями із праць: 1 – [8], 2 – [9], 3 – [10]

В роботі автори [17] запропонували універсальну напівемпіричну модель для кільцевого і стратифікованого режиму течії водяної пари, фреонів, метану, ізобутану, вуглекислого газу всередині горизонтальних та вертикальних труб.

Варто додати до вище перерахованих робіт, що деякі дослідники працювали над конденсацією пари всередині гладких труб із врахуванням наявності неконденсованих газів [18], [19].

Автори [20] досліджували вплив наявності повітря на коефіцієнт тепловіддачі при конденсації та режим течії всередині гладкої горизонтальної труби. В експериментах розглянули вплив масової частки неконденсованих газів, витрату газової суміші і тиск на вході в трубу. Коефіцієнт тепловіддачі зменшувався із збільшенням частки

неконденсованих газів. В роботі запропонували дві залежності для визначення тепловіддачі у випадку стратифікованого і кільцевого режиму течії на основі модифікованого числа Фруда.

В роботі [21] запропонували модель розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації всередині горизонтальних, вертикальних і похилих трубах. Модель дійсна для діапазону внутрішніх діаметрів від 2 мм до 50 мм, числа Прандтля  $Pr_f = 1-18$ , критерія Рейнольдса  $Re_f = 68-84827$ , масового паровмісту від 0,01 до 0,99 і масові швидкості потоку в діапазоні 3–850 кг/(м<sup>2</sup>с). У висновках автори відмічають про необхідність проведення більшої кількості досліджень в області низьких тисків та для випадку конденсації парів металів.

Основними причинами розбіжності розрахункових кореляцій можуть бути наступні: середньо-інтегральні коефіцієнти тепловіддачі вимірювались по довжині труби при одночасному існуванні різних режимів течії; не враховувалося яка частина труби зайнята струмком конденсату. В області масового паровмісту  $0 < x < 1,0$  розрахункові залежності для визначення середніх коефіцієнтів тепловіддачі побудовані без врахування зміни режиму течії двухфазного потоку по довжині і периметру труби. Не досліджений теплообмін в умовах співставного впливу сил тяжіння і міжфазного тертя потоку при  $P < 0,1$  МПа.

**Постановка завдання.** Метою статті є представлення отриманих результатів експериментального дослідження локальних та середніх за периметром труби коефіцієнтів тепловіддачі у разі конденсації водяної пари при низьких тисках та установлення причин неточності методів розрахунку теплообміну та гідродинаміки за теоретичними, напівемпіричними та емпіричними моделями.

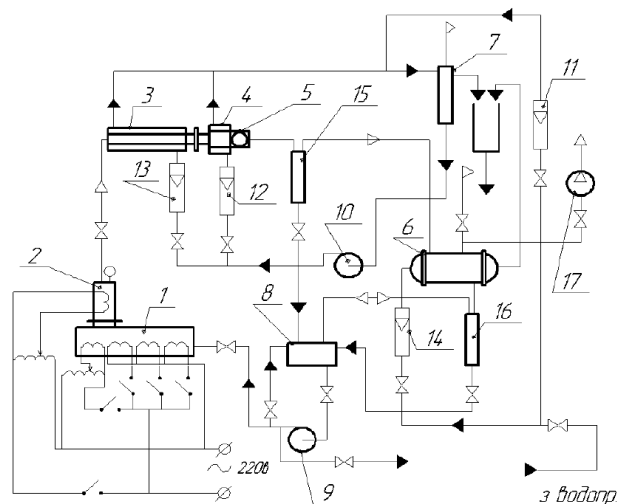
**Виклад основного матеріалу дослідження.** Об'єктом дослідження є процес теплообміну між двофазним потоком водяної пари і внутрішньою поверхнею стінки труби круглого перерізу.

Предмет дослідження: закономірності локальної та середньої тепловіддачі під час плівкової конденсації водяної пари всередині горизонтальної труби.

Для вивчення процесу використовували методу «товстої» стінки, який дозволяє дослідити вплив теплового потоку по довжині та периметру труби на локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі. Більш детальну інформацію про метод дослідження можна дізнатися в [22].

Експериментальні дослідження конденсації водяної пари всередині горизонтальної трубки

були проведені на стенді, схема якого наведена на рис. 3. Принципово установка складається із двох контурів: парової системи і водяної оболонки для охолодження. Паровий контур є замкнутим і включає у себе: електропарогенератор 1, сепаратор – перегрівач 2, передвключену (задаючу) ділянку 3, робочу ділянку 4, пристрій для візуальних спостережень 5, кінцевий конденсатор 6, ресивер 8, конденсаційний насос 9, 10 – циркуляційний насос, 11, 12, 13, 14 – ротаметри, 15, 16 – об'ємні вимірювачі кількості конденсату; 17 – вакуумний насос.



**Рис. 3.** Принципова схема експериментального стенду: 1 – електропарогенератор, 2 – сепаратор-перегрівач, 3 – задаюча ділянка, 4 – робоча ділянка, 5 – пристрій для візуальних спостережень, 6 – кінцевий конденсатор, 7 – змішувач, 8 – ресивер, 9 – конденсаційний насос, 10 – циркуляційний насос, 11, 12, 13, 14 – ротаметри, 15, 16 – об'ємні вимірювачі кількості конденсату, 17 – вакуумний насос

Матеріалом робочої секції є латунь,  $\lambda=90$  Вт/(м·К). Під час проведення дослідів при вакуумі перевірялося натікання повітря в систему. У всіх дослідях натікання не перевищувало 0,05% від витрати пари.

Вимірювання температури здійснювали за допомогою хромель-копелевих термопар діаметром термоелектродів 0,1 мм. Для тарування термопар використали рідинний термостат перед закладенням термопар у відповідні точки вимірювання. Термопари закладалися в п'яти кутових координатах  $\varphi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  та  $180^\circ$  (верхня частина труби). Витрати охолоджуючої води контролювали по ротаметрам типу РС-7. Об'ємним способом вимірювали витрати конденсату. За манометрами типу «МО» і барометром-анероїдом вимірювали атмосферний і барометричний тиски відповідно.

## Основні параметри експерименту при дослідженні конденсації водяної пари в умовах вакууму

Речовина	$G$ , кг/(м <sup>2</sup> с)	Паровміст $x$	$t_s$ , °C	$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	$w_v$ , м/с
Водяна пара	0,4–9,0	0,02–0,91	44–62	3,8–253,0	16–64

Досліди проводилися таким чином, щоб при незмінному значенні на досліджуваній ділянці конденсатору густини теплового потоку  $q$ , витраті конденсату в плівці і температурі насичення  $t_s$  змінювалася швидкість течії пари  $w_v$ . Стабільність заданих режимів визначалися по стабільності показань термопар, які вимірювали температури пари, стінки і охолоджувальної води, стабільності надлишкового і перепаду статичного тиску. Регулювання вакууму здійснювали шляхом дроселювання на лінії подачі вакуум-насоса. В процесі експериментальних досліджень основні параметри потоку змінювалися в межах представлених у таблиці 1.

**Висновки.** Дослідження конденсації водяної пари проводили при низьких тисках з температурою насичення в межах ( $t_s = 44\text{--}62^\circ\text{C}$ ) в середині гладкої труби  $d_{\text{вн}} = 16$  мм в діапазоні параметрів величин: швидкість пари на вході в трубу  $w_{\text{вх}} = 16\text{--}64$  м/с, масовий паровміст  $x = 0,02\text{--}1,0$ , густина теплового потоку  $q = 3,8\text{--}253$  кВт/м<sup>2</sup>.

Детальний аналіз існуючих методів прогнозування дозволяє дійти наступних висновків, що основними причинами неточності методів розрахунку теплообміну та гідродинаміки є:

- в значній частині робіт дані представлені лише у вигляді залежності коефіцієнта тепловіддачі від паровмісту  $x$  або масової швидкості  $G$ , що не дозволяє оцінити вплив теплового потоку на тепловіддачу при конденсації;
- у більшості опублікованих наукових працях автори вимірювали середні за периметром гладкої труби коефіцієнти тепловіддачі, що не дозволяє проаналізувати в повній мірі впливу на теплообмін швидкості пари, питомої густини теплового потоку, натікання конденсату;
- за наявності впливу ефекту швидкості пари коректність методу прогнозування тепловіддачі залежить від точності визначення втрат тиску на тертя  $(\Delta P/x)_f$  та об'ємного паровмісту  $\epsilon$ .

## Список літератури:

1. N. Voutchkov і G. Kaiser, Sustainable management of desalination plant concentrate-desalination industry position paper – energy and environment committee of the international desalination association (IDA) Presenter. 2019.
2. Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau, Ред., The United Nations world water development report 2014. Paris: UNESCO, 2014.
3. J. J. Feria-Díaz, M. C. López-Méndez, J. P. Rodríguez-Miranda, L. C. Sandoval-Herazo, і F. Correa-Mahecha, «Commercial Thermal Technologies for Desalination of Water from Renewable Energies: A State of the Art Review», Processes, вип. 9, вип. 2, с. 262, Січ 2021, doi: 10.3390/pr9020262.
4. J. Wang, X. Chen, T. Lu, X. Chen, S. Shen, B. Liu, «Three-dimensional film thickness distribution of horizontal tube falling film with column flow», Appl. Therm. Eng., с. 140–149, 2019.
5. H. Rabiee, K. R. Khalilpour, J. M. Betts, і N. Tapper, «Energy-Water Nexus: Renewable-Integrated Hybridized Desalination Systems», в Polygeneration with Polystorage for Chemical and Energy Hubs, Elsevier, 2019, с. 409–458. doi: 10.1016/B978-0-12-813306-4.00013-6.
6. Rifert, V., Sereda, V., Gorin, V. et al. Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of experimental research. Heat Mass Transfer 56, 691–713 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02744-5>
7. Rifert V, Zadiraka V (1978) Condensation of steam inside a smooth and profiled horizontal tube (in Russian). Teploenergetika Moscow 8:77–88
8. Thome J, El Hajal J, Cavallini A (2003) Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes. Int J Heat Mass Transf 46(18):3365–3387. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00140-6)
9. Cavallini A, Del Col D, Doretti L, Matkovic M, Rossetto L, Zilio C, Censi G (2006) Condensation in horizontal smooth tubes: a new heat transfer model for heat exchanger design. Heat transfer eng 27(8):31–38. <https://doi.org/10.1080/01457630600793970>
10. Shah M (2009) An improved and extended general correlation for heat transfer during condensation in plain tubes. Hvac&R Res 15(5):889–913. <https://doi.org/10.1080/10789669.2009.10390871>
11. Rifert V. R., Sereda V. V.: Condensation inside smooth horizontal tubes – Part 1. Survey of the methods of Heat-Exchange Prediction. Thermal Science 19 (2015) Nr. 5, S. 1769-1789
12. Rifert V. R., Sereda V. V., Barabash P. O., Gorin V. V.: Condensation inside smooth horizontal tubes – Part 2. Improvement of heat exchange prediction. Thermal Science 2016, Pages 45-45. doi:10.2298/TSCI140815045R
13. Nusselt W. Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. Zeitschrift VDI. 1916. Vol. 60. P. 541–546. 568–575.



14. Ananiev C. P., Boyko L. D., and Kruzhiilin C. N. Heat transfer in the presence of steam condensation in a horizontal tube. *Int. Heat Transf. Conf.* August 1961. Colorado. Part 2, Pp. 290-295.
15. Bae S., Maulbetsch J., Rohsenow W. *Refrigerant Forced-Convection Condensation Inside Horizontal Tubes. Report No. DSR-79760-64.* Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1969. 121 p.
16. Traviss D., Baron A., Rohsenow W. *Forced-Convection Condensation Inside Tubes. Report No. DSR-72591-74.* Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1971. 105 p.
17. Rifert V. G. Substantiation and the range of application of a new method for heat transfer prediction in condensing inside plain tubes / V. G. Rifert, V. V. Gorin, P. A. Barabash, A. S. Solomakha, V. V. Sereda // *ENERGETIKA: Scientific Journal of the Lithuanian Academy of Sciences.* – 2018. – Vol. 64. – № 3. – P. 146–154.
18. T. Wu, K. Vierow, Local heat transfer measurements of steam/air mixtures in horizontal condenser tubes, *Int. J. Heat Mass Transf.* 49 (2006) 2491–2501.
19. G. Caruso, D. Vitale di Maio, A. Naviglio, Condensation heat transfer coefficient with non-condensable gases inside near horizontal tubes, *Desalination* 309 (2013) 247–253.
20. B. Ren, L. Zhang, H. Xu, J. Cao, Z. Tao, Experimental study on condensation of steam/air mixture in a horizontal tube, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 58 (2014) 145–155.
21. Camaraza-Medina, Y., Hernandez-Guerrero, A., Luviano-Ortiz, J. L., Mortensen-Carlson, K., Cruz-Fonticiella, O. M., & García-Morales, O. F. (2019). New model for heat transfer calculation during film condensation inside pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 344–353. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.
22. Louahlija-Gualous H., Panday P.K., Artioukhine E. Inverse determination of the local heat transfer coefficients of nucleate boiling on a horizontal cylinder. *Journal of heat transfer, Transaction of the ASME.* 2003. № 125. P. 1087–1095.

#### **Boianivskiy V.P. HEAT TRANSFER DURING WATER STEAM CONDENSATION INSIDE HORIZONTAL FILM EVAPORATORS WITH SMOOTH TUBES**

*Horizontal film evaporators as the main heat exchange equipment have been widely applied in refrigeration, heat pump installations, air conditioning systems, heaters of power systems, evaporators of thermal desalination plants, etc.*

*Economic and environmental considerations are still driving a great interest of scientists to improve the efficiency of the power systems. In many cases, this is achieved by increasing the capacity of heat exchangers. For the efficient development film evaporators need accurate models for calculating the heat transfer coefficients from the heating side of tube and the cooling fluid side. Inaccuracy of the calculation can lead to increase in capital costs for production due to the increase in the size of the apparatus and, as a result, the heat exchanger will operate in suboptimal operating parameters.*

*In the second half of the last century, numerous models were proposed in the literature to predict local heat transfer coefficients for the condensation of pure saturated steam inside horizontal tubes. These methods were only partially successful due to the limited databases used and the use of poor or simplified transition criteria between flow regimes.*

*This work is devoted to the experimental study of water steam condensation inside a smooth horizontal tube  $d_{in} = 16$  mm in the range of parameters: steam velocity at the inlet to the tube  $w_{in} = 16–64$  m/s, mass vapor fraction  $x = 0,02–1,0$ , heat flux density  $q = 3,8–253$  kW/m<sup>2</sup>.*

*In this article, we analyzed the available theoretical, semi-empirical, and experimental models for calculating heat transfer during water vapor condensation inside horizontal tubes.*

*The main reasons for the discrepancy between the calculated correlations and the experimental data are: the influence of heat flux density, mass vapor flux, and vapor phase velocity on heat transfer is not shown; the average heat transfer coefficients were measured along the length of the tube while different flow regimes existed; and the part of the tube occupied by the condensate flow was not taken into account. In the region of mass vapor  $0 < x < 1,0$ , the calculation dependencies for calculating the average heat transfer coefficients were developed without taking into account the change in the flow regime of the two-phase flow along the length and perimeter of the tube.*

*The absence of a sufficient number of experimental studies at a pressure of  $P < 0,1$  MPa for the condensation region under the condition of a comparable influence of gravity and friction is noted.*

**Key words:** water steam, film condensation, heat transfer, heat transfer coefficient, shear stress, flow regime, horizontal tube.

**Волощук В.А.**

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

**Некрашевич О.В.**

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

**Богза М.С.**

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

**Гікало П.В.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ ТИПУ «ПОВІТРЯ-ВОДА»<sup>1</sup>

Теплонасосні установки мають широкі перспективи для систем тепло- та холодозабезпечення будинків. Для впровадження систем керування такими системами є потреба в дослідженні їх динамічних характеристик. Це можна реалізувати шляхом проведення експериментів або за рахунок створення та реалізації відповідних математичних та комп'ютерних моделей. У другому випадку часто використовується підхід, у якому фізичні процеси описуються диференціальними рівняннями збереження маси, енергії та, за потреби, моменту імпульсу.

В роботі, на основі математичного опису фізичних явищ, розроблено та реалізовано в комп'ютерному пакеті Matlab модель динамічних процесів у теплонасосній установці типу «повітря-вода» з установленою потужністю 10 кВт та використанням фреону R-134a як робочого тіла. Вхідними змінними моделі є температура і витрата повітря на вході у випарник, температура і витрата води на вході в конденсатор, а також частота обертання на валу компресора. Вихідним параметром реакції об'єкта є температура води на виході з конденсатора.

Модель було використано для дослідження динамічних характеристик об'єкта шляхом нанесення ступеневих збурень на вхідні параметри.

Виявлено, що досліджувані перехідні процеси можна апроксимувати аперіодичними ланками першого порядку. Визначено їх коефіцієнти передачі, сталі часу, які змінюються в межах 3...5 с, та час запізнювання, за наявності, який змінюється в межах 0,5...3 с.

Показано, що зміна температури та витрати води на вході у конденсатор мають більший вплив на вихідний параметр ніж збурення зі сторони випарника (зміна температури та витрати повітря на вході у випарник), що підтверджується збільшенням коефіцієнта передачі перехідних процесів.

Визначено, що при різних початкових умовах коефіцієнти передачі більшості перехідних процесів змінюються, що свідчить про нелінійність об'єкта керування.

Отриману модель буде використано для її інтеграції з динамічною моделлю системи тепло- та холодозабезпечення будинку з подальшим застосуванням у задачах синтезу систем автоматичного керування та предиктивного обслуговування такими системами.

**Ключові слова:** математична модель, ступеневе збурення, перехідний процес, динамічні характеристики, теплонасосна установка.

**Постановка проблеми.** Для синтезу системи автоматичного керування теплонасосних установок (ТНУ) необхідні дані щодо динаміч-

них характеристик цього об'єкта. За допомогою математичних та комп'ютерних моделей, де враховано перехідні процеси, такі характеристики можна отримати. В теперішній час роль подібних моделей зростає у зв'язку з застосуванням нових методів керування (прогнозне керування, «цифрові двійники» тощо). Для розроблення системи

<sup>1</sup> Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Ексергетичне обґрунтування нестационарних режимів та характеристик комбінованого тепло- та холодозабезпечення енергоефективних будівель на основі теплонасосних систем» (номер державної реєстрації НДР 0122U001750).

керування модель перехідних процесів повинна визначати ключові динамічні характеристики об'єкта і мати відносно малий час реалізації. Складністю моделювання перехідних процесів ТНУ є, зокрема, необхідність формалізації процесів тепло та масообміну в компонентах різного типу. Теплообмінники, які використовуються в цих системах працюють в умовах фазових переходів робочих тіл.

Моделі можуть створюватися на основі розгляду фізичних процесів, що відбуваються в об'єктах (physics-based models), та шляхом обробки експериментальних даних (data-based models) [1], [2], [3]. У випадку моделювання об'єкта шляхом формалізації фізичних процесів використовується декілька підходів. У найпростішому підході об'єкт розглядається як такий, де його характеристики не змінюються по координатах (об'єкт з зосередженими параметрами). Складніші та точніші підходи передбачають дискретизацію компонентів об'єкта і дають можливість врахувати зміну параметрів у просторі. Для врахування динаміки зміни зон фазових переходів використовується так званий метод рухомих границь [4] (moving-boundary formulation).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [5] розроблено модель динамічних процесів чилера як об'єкта з зосередженими параметрами. На основі фізичного підходу спочатку було розроблено систему нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку, потім ці рівняння було лінеаризовано, і, в результаті, модель представлено у просторі станів. Адекватність модель підтверджено серією експериментів з чилером, що використовує фреон R-134a. У порівнянні з експериментальними даними похибка результатів моделювання не перевищує 10%.

Пізніше в дослідженнях [6] автори запропонували модель динаміки чилера на основі методу рухомих границь для врахування перехідних процесів під час фазових перетворень. У моделях компресора та розширювального вентиля інерційність не враховувалася через незначний вплив. Точність моделі було оцінено шляхом проведення експериментів. Похибка в більшості випадків не перевищувала 10%.

Автори [7] навели порівняння часу реалізації моделі, що побудована на основі методу рухомих границь, з моделлю, яка створена шляхом дискретизації (метод контрольних об'ємів) і показали, що суттєвої різниці в отриманих результатах немає. Разом з тим, в роботі [7] вказано, що під час створення моделі динаміки парокомпресійної

установки, необхідно враховувати можливості, точність та час реалізації того чи іншого методу.

В роботі [8] запропоновано модель парокомпресійної теплонасосної установки типу «повітря-повітря» з фреоном R-407c, яку розроблено в MATLAB з використанням бібліотеки Simscape. Реалізація моделі дала можливість дослідити динаміку установки в складі системи обігріву будинку залежно від зміни температури навколишнього середовища.

Автори [9] для моделювання динамічних процесів у теплообмінниках парокомпресійної установки під час зупинки та включення в роботу використали метод рухомих границь. При цьому було запропоновано п'ять режимів роботи для конденсатора та два режими для випарника. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало задовільні результати.

В роботі [10] розроблено динамічну модель теплонасосної установки з урахуванням зміни частоти обертання вентилятора зовнішнього повітря й компресора для підвищення її енергоефективності та забезпечення теплового комфорту. Порівняння результатів моделювання з даними експерименту показало, що похибка не перевищує 5%. Для умов дослідження показано, що шляхом зміни частоти обертання вентилятора зовнішнього повітря та компресора можна знизити на 57% час виходу на заданий режим теплового комфорту та на 75% енергоспоживання.

Автори [11] запропонували методологію моделювання перехідних процесів парокомпресійних установок на основі методу скінченних об'ємів. Показано підвищення точності розрахунку за умови збільшення кроку дискретизації. Розраховані значення тисків у випарнику та конденсаторі добре узгоджуються з експериментальними значеннями. Вказано, що точність моделювання можуть бути підвищено шляхом врахування зміни масової витрати в розширювальному клапані та компресорі під час пуску установки, оцінювання залежності коефіцієнтів теплопередачі в теплообмінниках від фазового стану, а також за рахунок врахування втрат тиску в конденсаторі та випарнику.

В дослідженнях [12] з використанням методу скінченних об'ємів розроблено та реалізовано моделі перехідних процесів пластинчастих теплообмінників за умови їх використання як випарника та конденсатора у складі теплонасосної установки. Порівняння отриманих змодельованих даних з результатами експерименту показало високу точність – похибка знаходилася в межах  $0,11 \dots 1,1 \cdot 10^{-3}$ , що є значно меншим за допустиме

значення (0,05). Збільшення кількості комірок до двадцяти забезпечує одночасно і високу точність і швидкість обчислень.

В роботі [13] на основі методу скінченних об'ємів, для оцінювання перехідних процесів у парокомпресійних холодильних установках запропоновано три типи моделей. У першій, базовій, моделі передбачено найбільш загальні умови рівняння масового та енергетичного балансів випарника та конденсатора. У другій моделі не враховано втрати тиску у теплообмінниках. Третя модель додатково спрощує розрахунок масової витрати робочого тіла в комірках шляхом лінійної інтерполяції. Показано, що друга модель дає практично ті ж результати, що і базова, але зменшує час розрахунку. Третя модель суттєво погіршує точність отриманих даних у порівнянні з даними базової моделі.

Отже, літературний аналіз показав, що моделювання динаміки ТНУ можна з достатньою для достатньої точності здійснювати без врахування перехідних процесів у компресорі та розширювальному вентилі. Разом з тим, динамічні режими роботи таких систем суттєво визначаються перехідними процесами у випарнику та конденсаторі.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення динамічних характеристик ТНУ типу «повітря-вода» шляхом розроблення та реалізації математичної та комп'ютерної моделей такого об'єкта.

**Виклад основного матеріалу.** В роботі досліджувалася ТНУ типу «повітря-вода», розрахункова схема, якої наведена на рис. 1. У проектному режимі повітря з температурою  $-7^{\circ}\text{C}$  надходить у випарник (EV) і охолоджується до температури  $-12^{\circ}\text{C}$ . Відібрана від повітря теплота ( $\dot{Q}_{in}$ ) передається на випаровування робочого тіла (фреон R134a), яке потім подається у компресор (CM), де стискається за рахунок роботи ( $\dot{N}$ ). Після цього робоче тіло надходить у конденсатор (CD) і віддає енергію у формі теплоти воді системи опа-

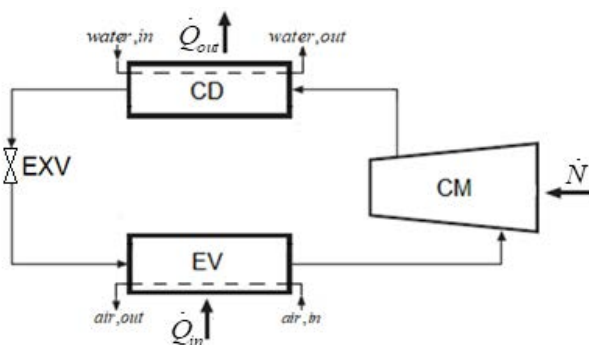


Рис. 1. Розрахункова схема ТНУ

лення, забезпечуючи її нагрівання від  $+40^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ . Проектна теплова потужність ( $\dot{Q}_{out}$ ) ТНУ становить 10 кВт. Після конденсатора робоче тіло рухається у розширювальний вентиль (EXV) для зниження тиску й температури з подальшим надходженням у випарник.

Рівняння енергетичного балансу робочого тіла в конденсаторі має вигляд

$$c_{wf,CD} M_{wf,CD} \frac{dT_{wf,CD}}{d\tau} = G_{wf} (h_{CD,in} - h_{CD,out}) - k_{CD} A_{CD} \left( T_{wf,CD} - \frac{T_{water,in} + T_{water,out}}{2} \right), \quad (1)$$

де  $c_{wf,CD}$  – теплоємність робочого тіла в області конденсатора, Дж/(кг·К);

$M_{wf,CD}$  – маса робочого тіла в області конденсатора, кг;

$T_{wf,CD}$  – температура робочого тіла в області конденсатора, К;

$G_{wf}$  – витрата робочого тіла через конденсатор, кг/с;

$h_{CD,in}$ ,  $h_{CD,out}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході з конденсатора, відповідно, Дж/кг;

$k_{CD}$  – коефіцієнт теплопередачі в області конденсатора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{CD}$  – площа теплопередачі, м<sup>2</sup>;

$T_{water,in}$ ,  $T_{water,out}$  – температури води на вході та виході з конденсатора, відповідно, К.

Рівняння енергетичного балансу води, що нагрівається в конденсаторі, має вигляд

$$\frac{1}{2} c_{water,CD} M_{water,CD} \frac{d(T_{water,in} + T_{water,out})}{d\tau} = G_{water} (h_{water,in} - h_{water,out}) + k_{CD} A_{CD} \left( T_{wf,CD} - \frac{T_{water,in} + T_{water,out}}{2} \right), \quad (2)$$

де  $c_{water,CD}$  – теплоємність води в області конденсатора, Дж/(кг·К);

$M_{water,CD}$  – маса води в області конденсатора, кг;

$T_{water,in}$ ,  $T_{water,out}$  – температура води на вході та виході з конденсатора, К;

$G_{water}$  – витрата води через конденсатор, кг/с;

$h_{water,in}$ ,  $h_{water,out}$  – питома ентальпія води на вході та виході з конденсатора, відповідно, Дж/кг.

Рівняння енергетичного балансу робочого тіла у випарнику має вигляд

$$c_{wf,EV} M_{wf,EV} \frac{dT_{wf,EV}}{d\tau} = G_{wf} (h_{EV,in} - h_{EV,out}) + k_{EV} A_{EV} \left( \frac{T_{air,in} + T_{air,out}}{2} - T_{wf,EV} \right). \quad (3)$$

де  $c_{wf,EV}$  – теплоємність робочого тіла в області випарника, Дж/(кг·К);

$M_{wf,EV}$  – маса робочого тіла в області випарника, кг;

$T_{wf,EV}$  – температура робочого тіла в області випарника, К;

$G_{wf}$  – витрата робочого тіла через випарник, кг/с;

$h_{EV,in}$ ,  $h_{EV,out}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході з випарника, відповідно, Дж/кг;

$k_{EV}$  – коефіцієнт теплопередачі в області випарника, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{EV}$  – площа теплопередачі, м<sup>2</sup>;

$T_{air,in}$ ,  $T_{air,out}$  – температури повітря на вході та виході з випарника, відповідно, К.

Рівняння енергетичного балансу повітря, що охолоджується у випарнику має вигляд

$$\frac{1}{2} c_{air, EV} M_{air, EV} \frac{d(T_{air, in} + T_{air, out})}{d\tau} = G_{air} (h_{air, in} - h_{air, out}) - k_{EV} A_{EV} \left( \frac{T_{air, in} + T_{air, out}}{2} - T_{wf, EV} \right), \quad (4)$$

де  $c_{air, EV}$  – теплоємність повітря в області випарника, Дж/(кг·К);

$M_{air, EV}$  – маса повітря в області випарника, кг;

$T_{air, in}$ ,  $T_{air, out}$  – температура повітря на вході та виході з випарника, К;

$G_{air}$  – витрата повітря через випарник, кг/с;

$h_{air, in}$ ,  $h_{air, out}$  – питома ентальпія повітря на вході та виході з випарника, відповідно, Дж/кг.

Коефіцієнт теплопередачі повітряного випарника (оребреного теплообмінника) визначається по відношенню до його зовнішньої поверхні

$$k_{EV} = \left( \frac{1}{\alpha_{air}} + \frac{1}{\alpha_{wf}} \cdot \frac{A_{air}}{A_{wf}} \right)^{-1}, \quad (5)$$

де  $A_{air}$  та  $A_{wf}$  – площі поверхонь нагріву випарника зі сторони повітря та зі сторони робочого тіла, відповідно, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{air}$  та  $\alpha_{wf}$  – відповідні коефіцієнти тепловіддачі зі сторони повітря та зі сторони робочого тіла, відповідно, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для конденсатора передбачено пластинчастий теплообмінник, у якому коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою

$$k_{CD} = \left( \frac{1}{\alpha_{water}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_{wf}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

де  $\alpha_{water}$  – коефіцієнт тепловіддачі зі сторони води, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_w$  – товщина пластини, м;

$\lambda_w$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини, Вт/(м·К);

Значення коефіцієнтів тепловіддачі робочого тіла у випарнику та конденсаторі приймалися відповідно до рекомендацій, які наведено в [14], [15], [16], [17], [18].

Витрата робочого тіла у тепловому насосі визначалась з залежності

$$G_{wf} = V_s \rho_{CM, in} N \eta_{vol}, \quad (7)$$

де  $V_s$  – робочий об'єм компресора, м<sup>3</sup>;

$N$  – частота обертання компресора;

$\eta_{vol}$  – об'ємний ККД компресора;

$\rho_{CM, in}$  – густина робочого тіла на вході у компресор, кг/м<sup>3</sup>.

Приймається, що у компресорі відсутній перехідний процес. Тоді енергетичний баланс цього компонента буде мати вигляд [19], [20]

$$W_{CM} = G_{wf} (h_{CM, out} - h_{CM, in}), \quad (8)$$

де  $G_{wf}$  – витрата робочого тіла через компресор, кг/с;

$h_{CM, in}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході у компресор, Дж/кг;

$h_{CM, out}$  – питома ентальпія робочого тіла на виході з компресора і визначалась за формулою

$$h_{CM, out} = h_{CM, in} + \frac{h_{CM, out, is} - h_{CM, in}}{\eta_{is}}, \quad (9)$$

де  $h_{CM, out, is}$  – питома ентальпія робочого тіла на виході з компресора після ізоентропійного стиснення, Дж/кг;

$\eta_{is}$  – ізоентропійний ККД компресора.

Об'ємний ( $\eta_{vol}$ ) та ізоентропійний ( $\eta_{is}$ ) ККД компресора розраховувалися на основі використання кореляційних залежностей та з застосуванням методики, що наведена в [21], [22]

$$\eta_{vol} = k_1 \cdot \left( 1 + k_s \cdot \frac{t_{CM, in} - 18}{100} \right) \cdot \exp \left( k_2 \cdot \frac{p_{CM, in}}{p_{CM, out}} \right); \quad (10)$$

$$\frac{\eta_{vol}}{\eta_{is}} = \left( 1 + k_e \cdot \frac{t_{CM, in} - 18}{100} \right) \cdot \exp \left( a \cdot \frac{T_1}{T_2} + b \right), \quad (11)$$

де  $t_{CM, in}$  – температура робочого тіла на вході у компресор, °С;

$p_{CM, in}/p_{CM, out}$  – ступінь стиснення робочого тіла в компресорі;

$T_1/T_2$  – відношення абсолютних температур конденсації та випаровування;

$k_1$ ,  $k_s$ ,  $k_2$ ,  $k_e$ ,  $a$  та  $b$  – коефіцієнти, які прийняті рівними 1.04, 0.15, -0.07, -0.1, -2.40, та 2.88, відповідно.

Розширювальний вентиль розраховано за умови незмінної ентальпії

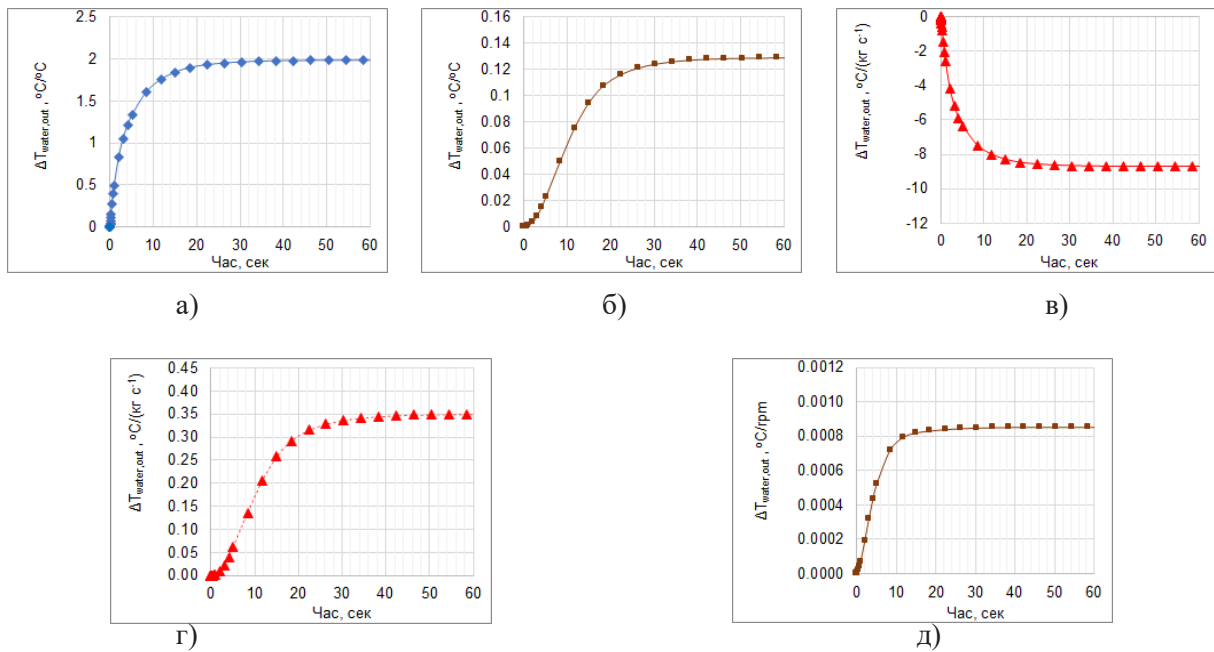
$$h_{EXV, in} = h_{EXV, out} \quad (12)$$

де  $h_{EXV, in}$  та  $h_{EXV, out}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході з розширювального вентиля, відповідно, кДж/кг.

Теплофізичні властивості робочих тіл, що використовуються у досліджуваному тепловому насосі визначалися за допомогою програми Coolprop [23].

У випадку експлуатації ТНУ найбільш значущим регульованим параметром є температура теплоносія на виході з конденсатора.

Динаміка зміни температури води на виході з конденсатора ( $T_{water, out}$ ) ТНУ за умови ступеневих збурень наведена на рис. 2. Як видно з рис. 2, збурення зі сторони конденсатора, а саме зміна температури ( $T_{water, in}$ ) та витрати ( $G_{water}$ ) води на вході у конденсатор мають більший вплив на вихідний параметр ніж збурення зі сторони випарника – зміна температури ( $T_{air, in}$ ) та витрати ( $G_{air}$ ) повітря на вході у випарник.



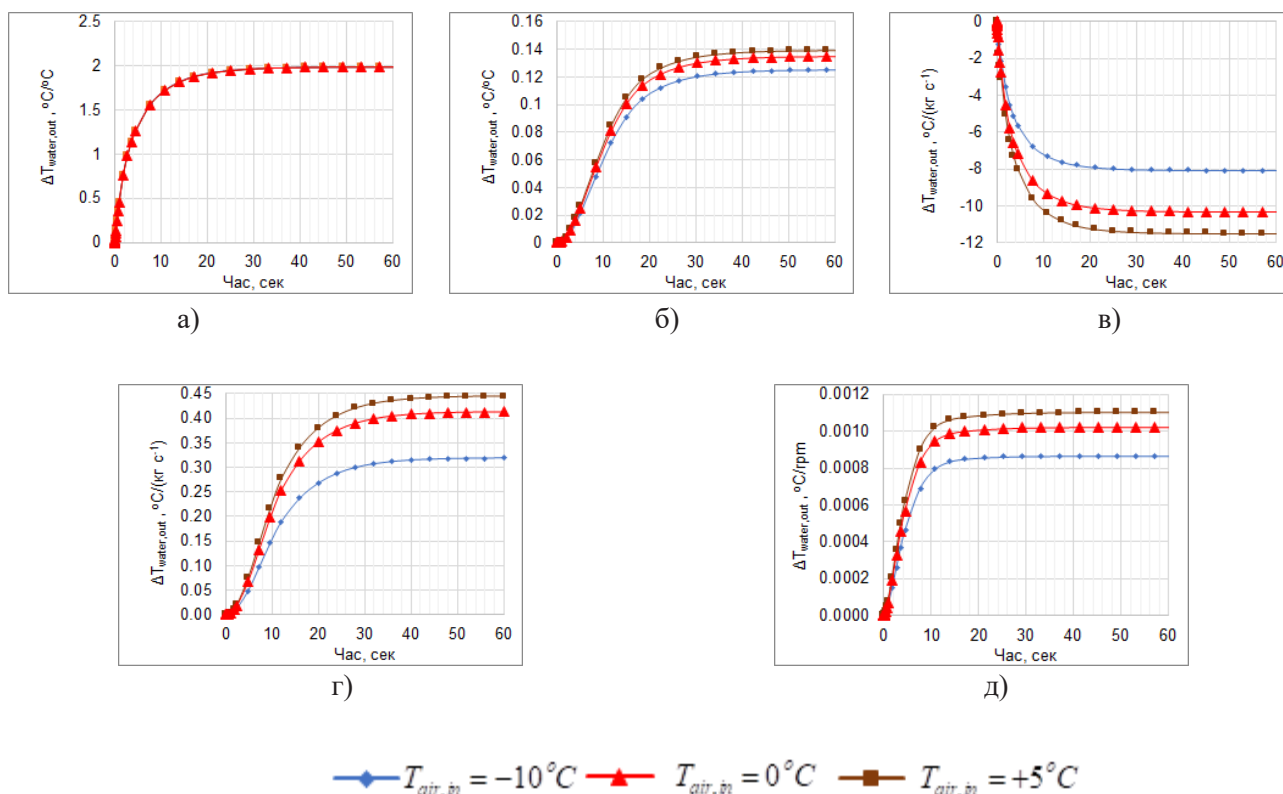
**Рис. 2.** Перехідні процеси зміни температури води на виході з конденсатора після нанесення ступеневого збурення: а) температурою води на вході в конденсатор на 1°C, б) температурою повітря на вході у випарник на 1°C, в) витратою води у системі опалення на 1 кг/сек, г) витратою повітря через випарник на 1 кг/сек, д) частотою обертання валу компресора на 1 rpm

З рис. 2 можна зробити висновок, що досліджувані перехідні процеси в об'єкті можна апроксимувати аперіодичними ланками першого порядку з або без запізнення.

Відповідно до отриманих результатів значення коефіцієнтів пропорційності між температурою води на виході з конденсатора та температурою води на вході в конденсатор, а також температурою повітря на вході у випарник дорівнюють, відповідно, 1,99°C /°C та 0,13°C /°C. Значення коефіцієнтів пропорційності по каналу  $G_{\text{water}} - T_{\text{water, out}}$  дорівнює -8,72 °C / (кг·с<sup>-1</sup>), а по каналу  $G_{\text{air}} - T_{\text{water, out}}$  становить 0,35°C / (кг·с<sup>-1</sup>). Зміна частоти обертання валу компресора ( $N$ ) також впливає на зміну температури  $T_{\text{water, out}}$  з коефіцієнтом пропорційності 0,00085°C /rpm. Сталі часу перехідних процесів зміни температури  $T_{\text{water, out}}$ , що зумовлені ступеневим зростанням температури та витрати води на вході в конденсатор, рівні відповідно 5 та 4,1 с (рис. 2, а, в). Ступеневі збурення температури та витрати повітря на вході у випарник можна апроксимувати перехідними процесами зміни температури води на виході з конденсатора аперіодичною ланкою першого порядку з сталою часу 3 с та часом запізнення 3,2 та 3 с, відповідно (рис. 2, б, г). У випадку ступеневого зростання частоти обертання валу компресора перехідний процес об'єкта має сталу часу 4,5 с та час запізнення 0,5 с.

В роботі, на основі розробленої моделі, досліджено вплив початкових умов на перехідні процеси у досліджуваній установці. Окремо розглянуто три варіанти початкових умов. У варіанті 1 початкові значення температури повітря на вході у випарник приймалися рівними -10, 0 та +5°C. Для варіанту 2 початкові значення частоти обертання валу компресора були рівними 3000, 3500, 4000 rpm. Варіант 3 характеризувався тим, що початкові значення температур води на вході в конденсатор становили +38, +43 та +48°C.

На рис. 3 наведено вплив початкової температури повітря на вході у випарник на перехідні процеси зміни температури води на виході з конденсатора під впливом різних ступеневих збурень. Як видно з рис. 2, а коефіцієнт пропорційності по каналу температура води на вході в конденсатор ( $T_{\text{water, in}}$ ) – температура води на виході з конденсатора ( $T_{\text{water, out}}$ ) не залежить від початкової температури повітря на вході у випарник. Разом з тим коефіцієнт пропорційності між температурою води на виході з конденсатора та температурою води на вході у випарник, витратою води системи опалення, витратою повітря через випарник, а також частотою обертання валу компресора у перехідному процесі зростає зі збільшенням початкової температури повітря на вході у випарник. Наприклад, для початкових значень температури повітря на вході у випарник - 10, 0 та +5°C коефіцієнт



**Рис. 3.** Перехідні процеси зміни температури води на виході з конденсатора ТНУ з різними значеннями початкової температури повітря на вході у випарник після нанесення ступеневого збурення (варіант 1): а) температурою води на вході в конденсатор на 1°C, б) температурою повітря на вході у випарник на 1°C, в) витратою води у системі опалення на 1 кг/сек, г) витратою повітря через випарник на 1 кг/сек, д) частотою обертання валу компресора на 1 rpm

пропорційності між температурою води на виході з конденсатора та температурою води на вході у випарник рівний, відповідно, 0,125, 0,135 та 0,140°C/°C (рис. 3, б).

На рис. 4 представлено перехідні процеси температури води після конденсатора на ступеневі збурення з різними значеннями початкової частоти обертання валу компресора: 3000, 3500, 4000 rpm.

З рис. 4 видно, що початкова частота обертання валу компресора не має впливу на перехідний процес зміни температури  $T_{water, out}$  у випадку ступеневого зростання температури води на вході в конденсатор (рис. 4, а). Для всіх інших видів збурень частота обертання валу компресора впливає на коефіцієнт передачі каналів збурень. З рис. 4 можна побачити, що коефіцієнт пропорційності по каналу збурення  $N - T_{water, out}$  зменшується і рівний, відповідно, 0,00091, 0,00084, 0,00078°C /rpm. у випадку зростання частоти обертання  $N$ , рівний, відповідно 3000, 3500 та 4000 rpm (рис. 4, д).

У решті перехідних процесах абсолютне значення коефіцієнта пропорційності між температурою води на виході з конденсатора та збуреннями

зростає зі збільшенням частоти обертання валу компресора.

На рис. 5 наведено реакцію температури води після конденсатора на ступеневі збурення вхідних параметрів з різними значеннями температур води на вході в конденсатор: +38, +43, +48°C.

З рис. 5 бачимо, що на відміну від попередніх варіантів, у цьому випадку початкова температура води на вході в конденсатор або взагалі не впливає (рис. 5, а, б), або несуттєво змінює (рис. 5, в, г, д) коефіцієнт пропорційності у перехідних процесах між вхідним збуренням та вихідним параметром.

**Висновки.** Розроблено та реалізовано динамічну модель для дослідження перехідних процесів у парокompresійній ТНУ «повітря-вода». Вхідними змінними моделі є температура і витрата повітря на вході у випарник, температура і витрата води на вході в конденсатор, а також частота обертання валу компресора. Вихідним параметром реакції об'єкта є температура води на виході з конденсатора.

З використанням розробленої моделі було змодельовано перехідні процеси ТНУ у випадку

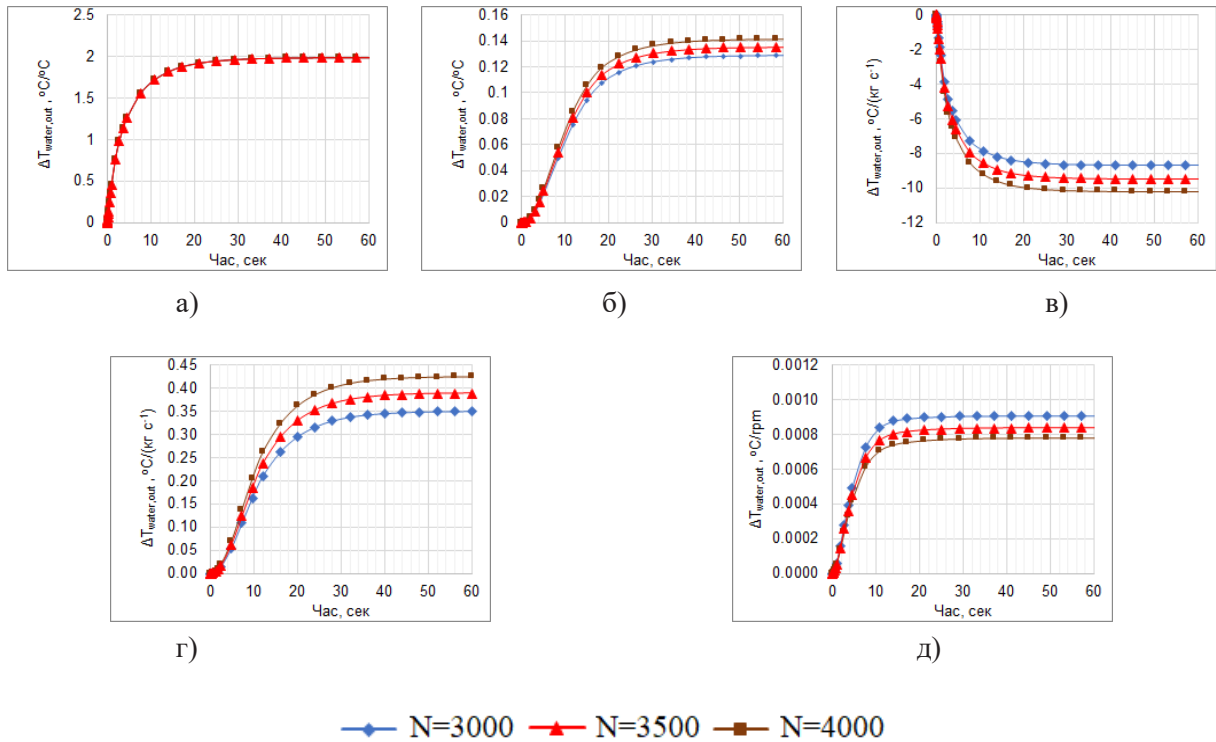


Рис. 4. Перехідні процеси зміни температури води на виході з конденсатора ТНУ з різними значеннями кутової швидкості компресора після нанесення ступеневого збурення (варіант 2): а) температурою води на вході в конденсатор на 1 °С, б) температурою повітря на вході у випарник на 1 °С, в) витратою води у системі опалення на 1 кг/сек, г) витратою повітря через випарник на 1 кг/сек, д) частотою обертання валу компресора на 1 rpm

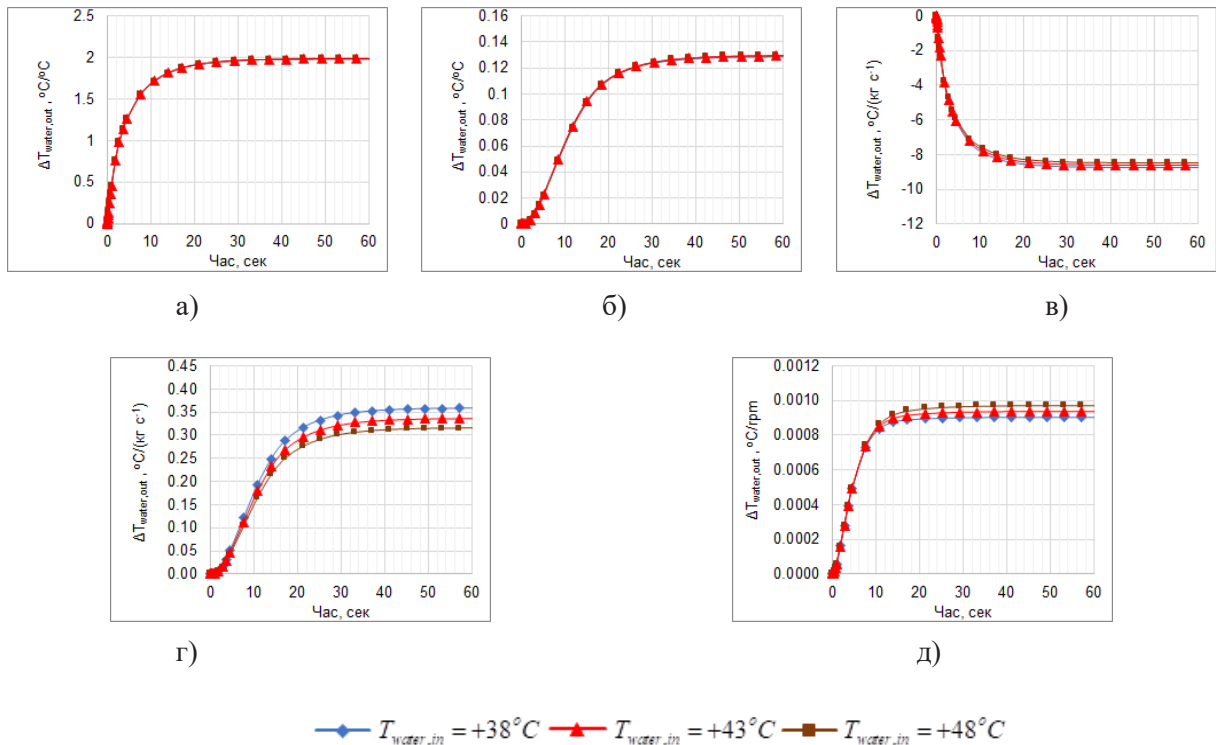


Рис. 5. Перехідні процеси зміни температури води на виході з конденсатора ТНУ з різними значеннями температури води на вході в конденсатор після нанесення ступеневого збурення (варіант 3): а) температурою води на вході в конденсатор на 1 °С, б) температурою повітря на вході у випарник на 1 °С, в) витратою води у системі опалення на 1 кг/сек, г) витратою повітря через випарник на 1 кг/сек, д) частотою обертання валу компресора на 1 rpm



різних збурень та початкових умов, що, своєю чергою, дало можливість дослідити динамічні характеристики об'єкта.

Виявлено, що досліджувані перехідні процеси можна апроксимувати аперіодичними ланками першого порядку.

Показано, що зміна температури та витрати води на вході у конденсатор мають більший вплив на вихідний параметр ніж збурення зі сторони випарника (зміна температури та витрати повітря на вході у випарник).

Визначено, що при різних початкових умовах коефіцієнти передачі більшості перехідних процесів змінюються.

Виявлено, що апроксимовані аперіодичними ланками першого порядку перехідні процеси зміни температури води на виході з конденсатора,

зумовлені ступеневим зростанням температури та витрати води на вході в конденсатор, мають сталі часу 5 та 4,1 с. Перехідні процеси зміни температури води на виході з конденсатора, зумовлені ступеневими збуреннями температури та витрати повітря на вході у випарник можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку зі сталою часу 3 с та часом запізнення 3,2 та 3 с. У випадку ступеневого зростання частоти обертання валу компресора апроксимований перехідний процес характеризується сталою часу 4,5 с та часом запізнення 0,5 с.

Отриману модель буде використано для її інтеграції з динамічною моделлю системи теплозабезпечення будинку з подальшим застосуванням у задачах синтезу систем автоматичного керування та предиктивного обслуговування.

### Список літератури:

- Goyal, A.; Staedter, M.A.; Garimella, S. A Review of Control Methodologies for Vapor Compression and Absorption Heat Pumps. *Int. J. Refrig.* **2019**, *97*, 1–20, doi:10.1016/j.ijrefrig.2018.08.026.
- Rasmussen, B.P. Review Article Dynamic Modeling for Vapor Compression Systems–Part I: Literature Review. **2012**, *18(5)*, 934–955, doi:10.1080/10789669.2011.582916.
- Afram, A.; Janabi-Sharifi, F. Review of Modeling Methods for HVAC Systems. *Appl. Therm. Eng.* **2014**, *67*, 507–519, doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.03.055.
- Grald, E.W.; MacArthur, J.W. A Moving-Boundary Formulation for Modeling Time-Dependent Two-Phase Flows. *Int. J. Heat Fluid Flow* **1992**, *13*, 266–272, doi:10.1016/0142-727X(92)90040-G.
- Yao, Y.; Huang, M.; Chen, J. State-Space Model for Dynamic Behavior of Vapor Compression Liquid Chiller. *Int. J. Refrig.* **2013**, *36*, 2128–2147, doi:10.1016/j.ijrefrig.2013.05.006.
- Yao, Y.; Wang, W.; Huang, M. A State-Space Dynamic Model for Vapor Compression Refrigeration System Based on Moving-Boundary Formulation. *Int. J. Refrig.* **2015**, *60*, 174–189, doi:10.1016/j.ijrefrig.2015.07.027.
- Rasmussen, B.P.; Shenoy, B. Review Article Dynamic Modeling for Vapor Compression Systems–Part II: Simulation Tutorial.
- Singh, S.; Sørensen, K. Dynamic Model of a Heat Pump Based House Heating System.; November 19 2018; pp. 87–94.
- Li, B.; Alleyne, A.G. A Dynamic Model of a Vapor Compression Cycle with Shut-down and Start-up Operations. *Int. J. Refrig.* **2010**, *33*, 538–552, doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.09.011.
- Song, K.; Jeon, Y.; Park, K.; Kim, Y. Dynamic Performance Characteristics of R410A Heat Pump with Consideration of Energy Efficiency and Thermal Comfort at Various Compressor Frequencies and Outdoor Fan Speeds. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *165*, 114499, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114499.
- Sanama, C.; Xia, X. Transient State Modelling and Experimental Investigation of the Thermal Behavior of a Vapor Compression System. *Math. Probl. Eng.* **2021**, *2021*, 1–14, doi:10.1155/2021/9941451.
- Salazar-Herran, E.; Martin-Escudero, K.; del Portillo-Valdes, L.A.; Flores-Abascal, I.; Romero-Anton, N. Flexible Dynamic Model of PHEX for Transient Simulations in Matlab/Simulink Using Finite Control Volume Method. *Int. J. Refrig.* **2020**, *110*, 83–94, doi:10.1016/j.ijrefrig.2019.11.003.
- Husmann, R.; Aschemann, H. Dynamic Modeling of a Vapor Compression Cycle. *IFAC-Pap.* **2022**, *55*, 523–528, doi:10.1016/j.ifacol.2022.09.148.
- Zhang, J.; Kærn, M.R.; Ommen, T.; Elmegaard, B.; Haglind, F. Condensation Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R134a, R1234ze(E), R245fa and R1233zd(E) in a Plate Heat Exchanger. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2019**, *128*, 136–149, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.124.
- Longo, G.A. Refrigerant R134a Condensation Heat Transfer and Pressure Drop inside a Small Brazed Plate Heat Exchanger. *Int. J. Refrig.* **2008**, *31*, 780–789, doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.11.017.
- Kedzierski, M.A.; Brown, J.S.; Koo, J. Performance Ranking of Refrigerants with Low Global Warming Potential. *Sci. Technol. Built Environ.* **2015**, *21*, 207–219, doi:10.1080/10789669.2014.974479.
- Shafiq, Q.N.; Liaw, J.-S.; Wang, C.-C. A Comprehensive Review on the Nucleate/Convective Boiling of Low-GWP Refrigerants: Alternatives to HFC Refrigerants. *Processes* **2023**, *11*, 468, doi:10.3390/pr11020468.

18. Posew, K.; Laohalertdecha, S.; Wongwises, S. Evaporation Heat Transfer Enhancement of R-134a Flowing inside Smooth and Micro-Fin Tubes Using the Electrohydrodynamic Technique. *Energy Convers. Manag.* **2009**, *50*, 1851–1861, doi:10.1016/j.enconman.2009.02.003.
19. Kinab, E.; Marchio, D.; Rivière, P.; Zoughaib, A. Reversible Heat Pump Model for Seasonal Performance Optimization. *Energy Build.* **2010**, *42*, 2269–2280, doi:10.1016/j.enbuild.2010.07.007.
20. Sanaye, S.; Chahartaghi, M.; Asgari, H. Dynamic Modeling of Gas Engine Driven Heat Pump System in Cooling Mode. *Energy* **2013**, *55*, 195–208, doi:10.1016/j.energy.2013.03.074.
21. Mateu-Royo, C.; Sawalha, S.; Mota-Babiloni, A.; Navarro-Esbrí, J. High Temperature Heat Pump Integration into District Heating Network. *Energy Convers. Manag.* **2020**, *210*, 112719, doi:10.1016/j.enconman.2020.112719.
22. Mateu-Royo, C.; Navarro-Esbrí, J.; Mota-Babiloni, A.; Amat-Albuixech, M.; Molés, F. Thermodynamic Analysis of Low GWP Alternatives to HFC-245fa in High-Temperature Heat Pumps: HCFO-1224yd(Z), HCFO-1233zd(E) and HFO-1336mzz(Z). *Appl. Therm. Eng.* **2019**, *152*, 762–777, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.047.
23. Bell, I.H.; Wronski, J.; Quoilin, S.; Lemort, V. Pure and Pseudo-Pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2014**, *53*, 2498–2508, doi:10.1021/ie4033999.

### **Voloshchuk V.A., Nekrashevych O.V., Bohza M.S., Hikalo P.V. DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN AIR-SOURCE HEAT-PUMP SYSTEM**

*Heat pump systems are regarded with great promise for further increased applications in heating and cooling systems. For implementation of automated control systems dynamic characteristics of such systems should be determined. This can be achieved with experiments or with development of mathematical and computer models. In the last case physical processes are described with differential equations of mass, energy and momentum conservation.*

*In this work a model expressing dynamic processes in an air-to-water heat pump system with an installed capacity of 10 kW and R-134a was developed and implemented in a software application. The input variables of the model were the temperature and flow rate of air at the evaporator inlet, the temperature and flow rate of water at the condenser inlet, and the compressor speed. The output parameter of the plant's response was the water temperature at the condenser outlet.*

*The model was used to study the dynamic characteristics of the plant by applying step disturbances to the input parameters.*

*It was found that the studied transient responses could be identified with first order models. The values of process gains, time constants, which changed within the range 3...5 s, and time delays, which changed within the range 0,5...3 s, were determined.*

*It was shown that disturbances of the temperature and water flow rate at the condenser inlet had higher impact on the output parameter than disturbances within the evaporator (temperature and air flow rate at the evaporator inlet), which was confirmed by increasing process gains.*

*It was found that under different initial conditions, the process gains of the most transient responses change, which indicated nonlinearity of the plant.*

*The obtained model will be used to integrate it with the dynamic model of the heating and cooling systems and further implementation in control systems and predictive maintenance.*

**Key words:** *mathematical model, step disturbance, transient response, dynamic characteristics, heat pump system.*

UDC 662.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/08>

**Volchyn I.A.**

Thermal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

**Provalov O.Yu.**

Thermal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

**Mokretskyy V.O.**

National University of Food Technologies

## EFFECT OF CATALYTIC FUEL ADDITIVE ON THE EFFICIENCY OF A GAS STEAM BOILER

*Reducing the negative impact of thermal power industry on the environment and climate can be achieved by increasing the efficiency of fuel use in the production of heat and electricity. This not only saves fuel, but also reduces emissions of pollutants and carbon dioxide as the main greenhouse gas. One of the ways to increase the boiler efficiency is the use of fuel additives that contribute to the intensification of the fuel combustion process. The REDUXCO catalytic fuel is used to increase the efficiency of the natural gas steam boiler, which accelerates the process of chain combustion of carbon monoxide and other gases. Industrial tests of a steam gas boiler with a steam productivity of 420 t/h were conducted at the Kaunas CHPP (Lithuania) to verify the feasibility of using the REDUXCO fuel additive to increase the efficiency of the boiler. The gross efficiency of the boiler was determined by a direct balance by measuring the amount of energy produced, transferred to steam, and the energy of burned natural gas. The introduction of a catalytic fuel additive into the primary air led to an increase in the gross efficiency of the gas boiler from 93.4% to 94.88%. An increase in boiler efficiency by 1.48% corresponds to a relative decrease in carbon dioxide emissions by 1.56%. A decrease in the temperature of flue gas at the outlet from 143 °C to 137 °C during 7 days of industrial experiments testified to the intensification of fuel combustion in the burner zone and the cleaning of the heating surfaces from soot particles in the furnace and convective pass. Intensification of burning natural gas in furnace chamber when using a fuel additive did not lead to an increase in the emission of nitrogen oxides. This is a consequence of reducing excess air in the furnace. The emission of carbon monoxide when supplying a catalytic additive to the fuel remained at a low level of about 10 ppm.*

**Key words:** fuel additive, steam boiler, natural gas, efficiency, emission reduction.

**Introduction.** The issues of combating climate change are global in all areas of human activity. The Paris Agreement and the materials of the last Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change testified to the desire of most countries in the world to reduce emissions of anthropogenic greenhouse gases [1, 2]. The thermal power industry, which uses hundreds of millions of tons of coal and billions of cubic meters of natural gas to generate electricity and heat, is traditionally one of the largest emitters of carbon dioxide, the emissions of which are predominant among the emissions of other greenhouse gases defined by the Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change [1, 3, 4]. Reduction of carbon dioxide emissions in thermal energy can be achieved by increasing the efficiency of using traditional carbon fuels [5] or burning carbon-free fuels in boilers, for example, hydrogen, ammonia or their mixture [6, 7].

Combustion of any organic fuel containing carbon leads to emissions of carbon dioxide, which is formed by an exothermic reaction:



Natural gas is a low-carbon fuel. The carbon dioxide emission coefficient  $k_{CO_2}$  for natural gas is 56.1 kg/GJ of fuel energy [4]. For coal, the carbon dioxide emission factor exceeds 100 kg/GJ.

If you divide the coefficient of carbon dioxide emission  $k_{CO_2}$  by the gross efficiency of the boiler  $\eta_{br}$ , you can get the value of the specific emission of carbon dioxide per unit of energy produced (kg/GJ or kg/Gcal). It will decrease as the efficiency of the boiler increases. With a gross efficiency value of 93%, the specific emission of carbon dioxide will be 60.32 kg/GJ, and with  $\eta_{br} = 95\%$  is 59.05 kg/GJ.

The relative decrease in carbon dioxide emissions after the implementation of the measure, which increases the efficiency of the boiler, is described by the dependence [5]

$$\Delta C = 1 - \eta_1/\eta_2 \quad (2)$$

where  $\eta_1$  is the effectiveness before the implementation of the measure, %

$\eta_2$  is efficiency after implementation of the measure, %.

A similar formula describes the relative decrease in fuel consumption after the implementation of the measure, which increases the efficiency of the boiler [5]:

$$\Delta \epsilon = 1 - \eta_1/\eta_2 \quad (3)$$

The gross efficiency of the boiler  $\eta_{br}$  according to the direct method is determined as the ratio of the amount of heat received in the boiler by the working medium (water, steam),  $Q_1$ , kJ/s, to the amount of heat introduced into the boiler,  $Q_{in}$ , kJ/s

$$\eta_{br} = 100 \times Q_1/Q_{in}, \% \quad (4)$$

The amount of heat received by the working body (water and steam) in a steam boiler without intermediate overheating can be determined by the formula

$$Q_1 = D_{se} \cdot (i_{se} - i_w) + D_{pr} \cdot (i' - i_w) \quad (5)$$

where  $D_{se}$  is the consumption of hot steam in the boiler, kg/s;

$i_{se}$  is enthalpy of hot steam, kJ/kg;

$i_w$  is enthalpy of feed water, kJ/kg;

$D_{pr}$  is water consumption for purging, kg/s;

$i'$  – enthalpy of purge (boiling) water, kJ/kg;

The specific amount of heat introduced into the boiler during the combustion of fuel with a flow rate of  $B$ , m<sup>3</sup>/s (for gas fuel),  $Q_{in}/B$ , kJ/m<sup>3</sup>, consists of the lower heat of combustion for the working state of the fuel  $Q_i'$ , kJ/m<sup>3</sup>, the specific physical heat of the fuel  $Q_{fl}$ , kJ/m<sup>3</sup>, and specific physical heat of the input air  $Q_{air}$ , kJ/m<sup>3</sup>:

$$Q_{in}/B = Q_i' + Q_{fl} + Q_{air} = Q_i' + c_{fl} \times T_{fl} + \epsilon_{ex} \times V^0 \times c_{air} \times T_{ca} \quad (6)$$

where  $c_{fl}$  is the heat capacity of gas fuel, kJ/(m<sup>3</sup>×K);

$T_{fl}$  is fuel temperature, K;

$\epsilon_{ex}$  is air equivalent ratio;

$V^0$  is stoichiometric air consumption for gas combustion, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$c_{air}$  is heat capacity of air, kJ/(m<sup>3</sup>×K);

$T_{ca}$  is the temperature of cold air, K.

As a rule,  $Q_i' \gg (Q_{fl} + Q_{air})$ , so they are often limited to the first term in formula (6).

Over many years of operation of the boilers, a few measures to increase the use of fuel were developed and implemented: special burners, optimization of air supply conditions to the boiler fuel, cleaning of heating surfaces, elimination of parasitic air suction, etc.

One of the ways to increase boiler efficiency is the use of special fuel additives. These additives can improve the efficiency and intensity of fuel combustion. This attracted the attention of many researchers to develop additives [8-11]. Most often, fuel additives were developed for solid fuel boilers, as it contributes

to the reduction of significant heat losses due to the presence of unburned carbon in the waste.

When entering the combustion zone, fuel additives are heated to high temperatures, as a result of which molecular bonds in them are broken with the formation of chemically active atoms and radicals, which contribute to the intensification of the fuel combustion process [8]. This process is accompanied by numerous explosions and the release of additional energy, which can be visually determined by the increase in the brightness of the fireball (the Lenard effect). The water contained in the additive is intensively decomposed into atomic (radical) hydrogen (H), oxygen (O) and hydroxyl (OH), increasing the reactivity of the fuel and intensifying the process of its combustion.

When using organic fuel additives, the flame temperature increases in the initial part of the combustion chamber and decreases at the exit from it. This indicates that the air mixture takes less time and, accordingly, burns faster. Organic fuel additives were sprayed onto dried coal powder, evenly distributed on a flat surface in a layer 3–5 mm thick. Organic fuel additives Omstar-DX1 and Open Flame are mixtures of light ethers. The use of Omstar-DX1 and Open Flame additives with a concentration of up to 5 cm<sup>3</sup>/kg of coal leads to a somewhat more efficient burning of Ekibastuz low-grade coal and contributes to the reduction of emissions of carbon oxides CO and nitrogen oxide NO, an increase in the concentration of carbon dioxide CO<sub>2</sub> and a more complete combustion of fuel [9].

In the article [10], samples of fuel additives – modifiers made using salts: CuSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, NaCl, NH<sub>4</sub>Cl, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub> and urea were investigated. The modifier for burning fine coal is an aqueous solution containing 25% of active substances. For greater dosing accuracy, modifiers were used in the form of aqueous solutions, which are easier to apply by spraying on the fuel before feeding it to the boiler. The concentration of the active components of the modifier was selected so that the consumption of the aqueous solution was within 2-3 Liters per Mg of coal. The tests were carried out in a laboratory boiler with a thermal capacity of 12 kW, equipped with a grate retort furnace. Higher boiler efficiency and reduced emissions of pollutants were observed. In the pulverized coal combustion tests using the above modifier, the flue gas levels of carbon monoxide CO, nitrogen oxides NO<sub>x</sub>, and carbon dioxide SO<sub>2</sub> were reduced by approximately 9%, 12%, and 10%, respectively, compared to the combustion test without the modifier. In this case, the efficiency of the boiler increased from 65% in the test without the modifier to 76% in the test with the modifier.

In the article [11], the additive used was a 20% aqueous solution of four different

compounds. It contained manganese II acetate tetrahydrate, isopropanol, glacial acetic acid, and N,N-dimethylethanolamine. The first component was used to increase the oxidizing capacity of the fuel, so it should act as a catalyst and reduce heat loss of unburned fuel. Isopropanol was used to prevent ice caps from forming in dosing lines, while N,N-dimethylethanolamine was found to prevent corrosion. In turn, for experimental purposes, glacial acetic acid was added as a component that should remove deposits from the surfaces of the boilers. Studies using the STA (simultaneous thermal analysis) technique, which allows simultaneous measurements of TG (thermogravimetric) mass changes and DSC (differential scanning calorimetry) thermal effects, showed that combustion with and without the additive was the same, but there were a few notable differences. First of all, the additive affects the ignition temperature of fuel  $T_i$ , which becomes lower by about 10 K. In studies on an industrial water heating boiler WR-10, the use of the additive at a rate of 0.1 l/kg of coal led to a reduction in flue gas heat loss and heat loss due to the presence of unburnt carbon by about 2%. Boiler efficiency increased from 86.05% to 88.15%. The increase in efficiency not only contributes to fuel economy, it also reduces  $CO_2$  emissions per unit of energy by 5%.

To determine the effect of the REDUXCO fuel additive on the efficiency of a steam boiler on natural gas, industrial comparative experiments were conducted in the amount necessary to determine the gross efficiency of the boiler according to the direct balance, heat loads, heat losses during the combustion of natural gas, the formation of emissions of pollutants and their comparison during operation without and with the addition of REDUXCO, respectively.

**Methods and materials.** The REDUXCO fuel additive is an aqueous solution of the reaction product of acetic acid and acetylferrocene and butan-1-ol and 2-methylpropan-1-ol and propan-1-ol and propan-2-ol. It is registered in the European Chemicals Agency REACH ECHA [12]. chemical formula:  $C_5H_5FeC_5H_4COC_xH_n$ . This additive is a source of formation of free radicals in a gaseous environment when it evaporates in a high-temperature environment. The use of REDUXCO catalytic additive contributes to lower activation energy of chemical reactions [13]. As a result, chain radical reactions of gas-phase oxidation of CO and hydrocarbons occur at a higher rate. In Figure 1 shows a scheme of chain high-temperature oxidation (combustion) of carbon monoxide [14]. The positive effect of this combustion additive due to chain radical reactions in a gas medium on increasing the efficiency of the water boiler is described in [15].

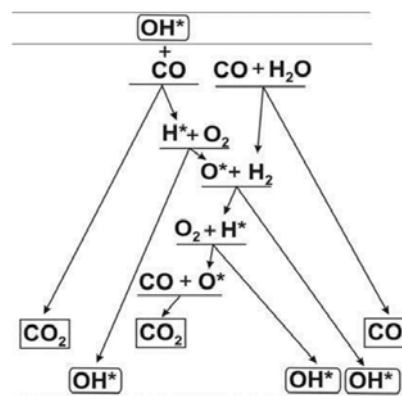


Fig. 1. The chain mechanism of carbon oxide combustion

The experimental research of the use of REDUXCO fuel additive were carried out at Kaunas Combined Heat and Power Plant (CHPP), Lithuania, on steam boiler No. 3 types of E-420-13.8-560 GMN (BKZ-420-140 GMN-4). The boiler is designed for operation on natural gas or fuel oil with steam turbines at high steam parameters. Experiments were carried out with constant consumption of natural gas per boiler.

The E-420-13,8-560 HMN boiler (Figure 2) is a vertical water-tube, single-drum with natural circulation, single-body, U-shaped layout in a gas-tight version of a closed layout and designed for high steam parameters, intended for operation under pressure. Table 1 shows the main design characteristics of the E-420-13.8-560 GMN.

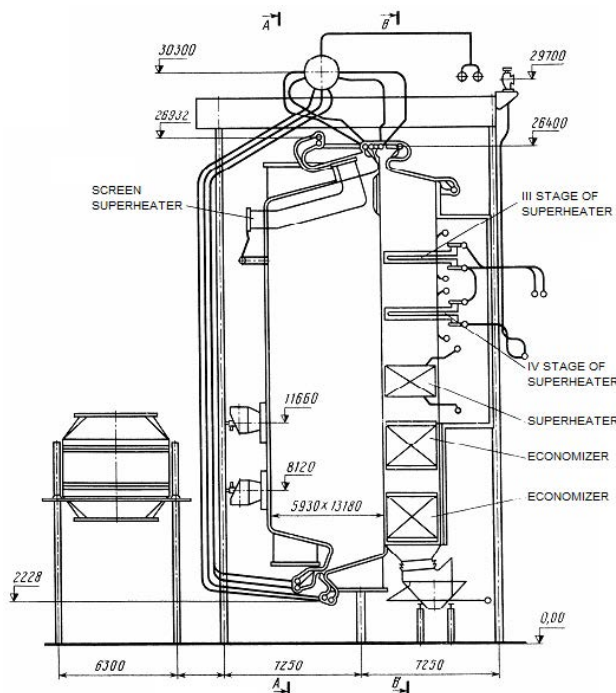


Fig. 2. Longitudinal section of boiler E-420-13.8-560 GMN (BKZ-420-140 NGM-4)

The prismatic furnace chamber of the open type, with dimensions in plan along the pipe axes of  $5.93 \times 13.18 \text{ m}^2$ , has a volume of  $1427 \text{ m}^3$ . The fuel chamber and the convective shaft are shielded with membrane panels made of smooth pipes  $\text{Ø } 60 \times 6 \text{ mm}$  (steel 20 and 15KGM) with welded strips (steel 20) and pipe pitch 80 mm.

Table 1  
Main Specifications of E-420-13.8-560 GMN Boiler

Rated steam capacity, t/h	420
Type of fuel	natural gas, fuel oil
Steam pressure at the outlet of the superheater, MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	13.8 (140)
Temperature, °C:	
superheated steam	560
feed water	230
flue gas	109/147*
Efficiency (gross), at rated load, %:	
calculated	94.8/93.4*
warranty	94/93*
Fuel consumption, t/h:	
natural (for NG – m <sup>3</sup> /h), t/h	$30.2 \times 10^3 / 28.5^*$
coal equivalent (LHV = 29.3 MJ/kg)	38.2
Aerodynamic resistance of the tract on the side, mm of the w.c.:	
flue gas	318.6
air	76.4
Heat output, Gcal/h	250
Temperature in the air heater, °C:	
air:	
inlet	30/70*
outlet	235/272*
flue gas:	
inlet	293/336*
outlet	109/147*
Thermal stress of the furnace cross-section, kcal/(m <sup>2</sup> ×h)	$1.66 \times 10^6$
Thermal stress of the furnace volume, kcal/(m <sup>3</sup> ×h)	$183 \times 10^3$
Furnace volume, m <sup>3</sup>	1427
Cell dimensions along the column axes, m:	24×36
Height to the top of the spinal beam, m	32.4
* In the numerator, data for natural gas combustion, in the denominator – for fuel oil	

The down part of the furnace is created by front and rear screens, has an inclination of 15° to the horizontal. The front screen from above forms an inclined ceiling of the firebox; the rear screen turns into a three-row festoon.

The blocks of the furnace chamber and the convective gas duct are suspended on rods to the ceiling of the boiler frame and freely expand downwards. The furnace is equipped with eight combined gas and oil burners located in two tiers (four in each tier).

The drum of the boiler is of welded construction, has an internal diameter of 1600 mm with a wall thickness of 112 mm (steel 16GNMA).

The steam path of the superheater consists of two independent streams. The temperature of superheated steam is regulated by injecting its own condensate and recirculating flue gas to the air path of the burners.

The boiler is equipped with the necessary fittings, devices for sampling, as well as control and measuring devices. The processes of feeding the boiler, regulating the temperature of superheated steam and burning fuel are automated.

For air heating, the boiler is equipped with two rotating regenerative air heaters with a rotor diameter of 5.4 m.

The boiler is equipped with an operational control system, the data of which is output to a computer and can be processed both graphically and tabularly. Subsequently, these data were used to calculate the efficiency of the boiler unit (determination of gross efficiency) according to the direct balance. A TESTO-350 portable gas analyser was used to assess the environmental characteristics of flue gas (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> content).

**Research results and their discussion.** The boiler tests began on February 25, 2013 at 12:00. On the first day of testing, the REDUXCO fuel additive was not used. This day of operation without the supplement was taken for comparison. Supply of the REDUXCO additive to the boiler with a specific consumption of 40 ml of solution per 1000 m<sup>3</sup> of natural gas [13] began on February 26, 2013 at 12:00. It was accompanied by a decrease in air consumption for gas combustion throughout the period of REDUXCO additive injection (excess air in furnace  $\alpha \leq 1.02$ ). In Fig. 3 shows the values of the gross efficiency of the boiler according to the direct balance of the boiler during the experiments. Each test day was divided into 4 periods: 1st period – 00:00-08:00, 2nd period – 08:00-12:00, 3rd period – 12:00-16:00, 4-and period – 16:00-23:59. It can be seen from the figure that the operation of the boiler unit was characterized by significant instability at different times of the day. The highest efficiency value was reached at night from 0:00 to 8:00, the lowest value was from 12:00 to 16:00. During the study, after the addition of the fuel additive, there was a monotonous increase in the efficiency of the boiler unit by an average of 0.3% per day, and by the end of the tests, it increased by 1.48% – from 93.4% to 94.88%.

In Fig. 4 shows the calculation data of the average daily efficiency of the boiler unit. Each test day was divided into 4 periods: 1st period – 00:00-08:00, 2nd period – 08:00-12:00, 3rd period – 12:00-16:00, 4- and

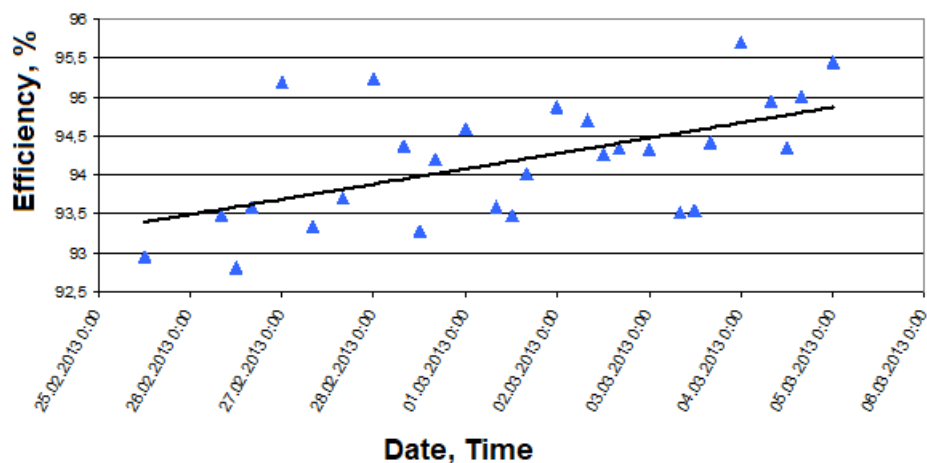


Fig. 3. Change in the efficiency of the 420 t/h steam boiler No. 3 of the Kaunas CHPP during the research period

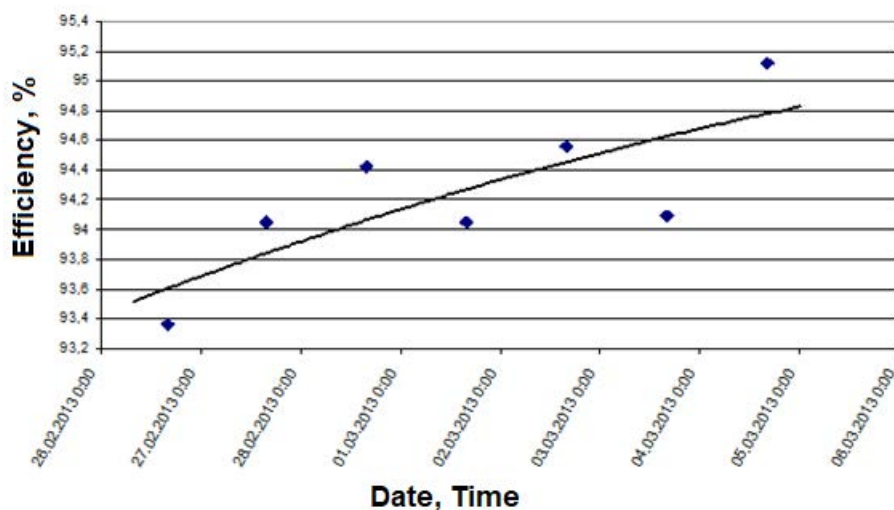


Fig. 4. Change in the average daily value of the efficiency gross of a boiler with 420 t/h steam capacity

period – 16:00-23:59. From Fig. 3 and Fig. 4, it can be seen that the operation of the boiler was characterized by significant instability at different times of the day. The highest efficiency value was reached at night from 0:00 to 8:00, the lowest – from 12:00 to 16:00. During the tests, after the addition of the fuel additive, a monotonous increase in the average daily value of the boiler efficiency was noted by approximately 0.3%, and by the end of the experiments, it increased by 1.48% – from 93.4% to 94.88% (Fig. 4).

The measurements of the exit flue gas temperature at the boiler outlet showed a gradual decrease in the exhaust gas temperature from 143°C to 137°C (Fig. 5). The reason for the decrease in the existing temperature of the flue gas is the intensification of the combustion process in the furnace and the improvement of heat transfer from the flue gases to the heating surfaces due to the cleaning of their surfaces.

One day after the addition of the additive, the flue gas temperature decreased to 139.8°C (Table 2), which is evidence of the concentration of natural gas combustion in the fuel itself. A further decrease in flue gas temperature is caused by the completion of a long process of high-temperature oxidation of low-reactivity soot deposits by a radical mechanism in a convective pass [16, 17].

Table 2 shows the average values of measurements of environmental parameters of flue gases during the research. Measurements of the NO<sub>x</sub> content in the flue gas showed values from 205 to 198 mg/Nm<sup>3</sup>. The supply of REDUXCO fuel additive practically did not affect the values of nitrogen oxides emissions.

But the reduced outlet temperature of flue gas is still much higher than the design temperature for burning natural gas – 109 °C. The use of a catalytic additive localized the burning of the gas torch in the zone of the

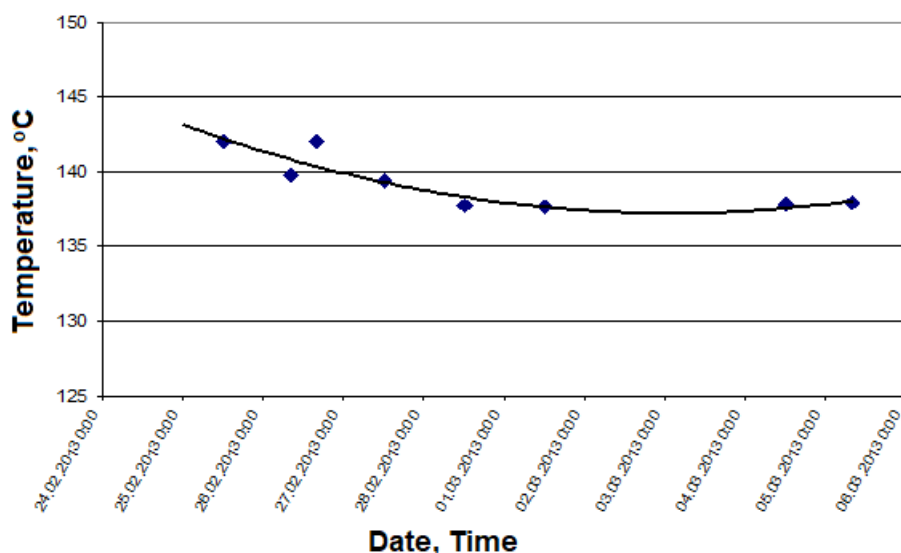


Fig. 5. Change in the outlet temperature of flue gas

Table 2

Results of Measurements of Environmental Characteristics of Flue Gas

Parameter	Date					
	25.02.13	26.02.13	27.02.13	28.02.13	01.03.13	04.03.13
Content O <sub>2</sub> , %	5.41	5.64	5.32	5.36	5.37	5.39
CO <sub>2</sub> , %	10.11	9.95	10.17	10.13	10.12	10.12
CO, mg/Nm <sup>3</sup>	5.7	0.5	6.0	6.0	10.6	9.25
NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	208.3	226.25	200.6	200.6	198.6	204.8
Temperature of flue gas, °C	143.0	139.8	139.4	137.7	137.6	137.8

burners, which made it possible to reduce the excess air in the fuel below the design value since there is no high-temperature corrosion when burning natural gas.

The use of REDUXCO catalytic fuel additive made it possible not only to increase boiler efficiency by 1.48%, but also to reduce carbon dioxide emissions by 1.56%:

$$\Delta C = 1 - \eta_1/\eta_2 = 1 - 93.4/94.88 = 0.0156 = 1.56\%$$

Another positive effect of the use of fuel additive is the achievement of the design efficiency of the gross operation of a boiler on natural gas – 94.8% (table 1).

**Conclusions.** According to the results of the tests of boiler unit E-420-13.8-560 at Kaunas CHPP in order to compare the technical, economic and ecological characteristics of the boiler unit without and with the use of REDUXCO fuel additive, the following main effects were:

1. When using a catalytic combustion additive for 7 days, there was a gradual increase in boiler efficiency gross by 1.48%, which was determined by direct measurements. This made it possible to achieve the design efficiency of the gas-fired boiler.

2. The use of REDUXCO fuel additive resulted in a reduction of carbon dioxide emissions by 1.56%.

3. During the entire test period, a gradual decrease in the temperature of the flue gases from 143°C to 137°C was observed, which is associated with intensification of combustion in the furnace and cleaning of the heating surfaces in the convective pass.

4. Increasing the intensity of burning natural gas in fuel when using a fuel additive did not lead to an increase in the emission of nitrogen oxides. This is a consequence of reducing air excess in the furnace.

**Bibliography:**

1. Kuh, K. F. The Law of Climate Change Mitigation: An Overview. *Encyclopedia of the Anthropocene*, monography/M.I. Goldshtein, D. DellaSala, 2018, 505–510. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.10027-8>.
2. The Paris Agreement. United Nations. 2015. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. (Date of application 22.05.2023).
3. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1997. URL: <https://unfccc.int/documents/2409>. (Date of application 22.05.2023).
4. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Energy. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (Date of application 22.05.2023).



5. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants / Thierry Lecomte, José Félix Ferrería de la Fuente, Frederik Neuwahl, Michele Canova, Antoine Pinasseau, Ivan Jankov, Thomas Brinkmann, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho. EUR 28836 EN; 2017. <https://doi.org/10.2760/949>.
6. Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J. Ammonia for Power. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018, Vol. 69. P. 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.07.001>.
7. Kobayashi Hideaki, Hayakawa Akihiro, Kunkuma K.D., Somarathne A., Okafor Ekenechukwu C. Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019. Vol. 37. P. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
8. Chavda R., Mahanwar P. Effect of inorganic and organic additives on coal combustion: a review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2018, **41**, 10, <https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1536046>
9. Messerle V.E., Paskalov G., Umbetkaliyeva K.A., Ustimenko A.B. Application of Organic Fuel Additives to Enhance Coal Combustion Efficiency. *Thermal Engineering*, 2020, Vol. 67, No. 2, P. 115–121. <https://doi.org/10.1134/S0040601520020044>.
10. Tic W.J., Guziałowska-Tic J. The Effect of Modifiers and Method of Application on Fine-Coal Combustion. *Energies*, 2019, Vol. 12, P. 4572; <https://doi.org/10.3390/en12234572>.
11. Junga, R., Pospolita J., Niemiec, P., Dudek M., Szleper, R. Improvement of coal boiler's efficiency after application of liquid fuel additive. *Applied Thermal Engineering*, 2020. Vol. 179. Article 115663. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115663>.
12. REDUXCO. Reaction products of acetic acid and acetylferrocene and butan-1-ol and 2-methylpropan-1-ol and propan-1-ol and propan-2-ol. URL: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.112.877>. (Date of application 22.05.2023)
13. REDUXCO. Katalizator spalania. URL: <http://dagas.pl/images/pdf/reduxco-PL.pdf> (Date of application 22.05.2023)
14. Volchyn I. A., Provalov A. Yu. Tests of combustion activators on the TP-100 boiler unit. *Energetika ta elektrifikatsiia*. [Energy and electrification]. 2012. No. 6. pp. 45–53. (Rus.)
15. Przybylski W., Majcher M., Borkowski L., Jaroszek A. (2010). Impact of REDUXCO Catalyst Addition to Incineration Chamber on Effectiveness and Reliability of WR 15-N Boiler Work in Heating Plant in Strzelce Opolskie. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2010, No. 12 (1), P. 947–954.
16. Fenimore, C. P., & Jones, G. W. Oxidation of soot by hydroxyl radicals. *The Journal of Physical Chemistry*, 1967, Vol. 71(3), P. 593–597. <https://doi.org/10.1021/j100862a021>.
17. Puri, R., Santoro, R.J., Smyth, K.C. (1994). The oxidation of soot and carbon monoxide in hydrocarbon diffusion flames. *Combustion and Flame*, 1994, Vol. 97(2), P. 125–144 [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90001-9)

### **Вольчин І.А., Провалов О.Ю., Мокрецький В.О. ВПЛИВ КАТАЛІТИЧНОЇ ПАЛИВНОЇ ДОБАВКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЗОВОГО ПАРОВОГО КОТЛА**

Зниження негативного впливу теплоенергетики на навколишнє середовище та клімат можна досягти за рахунок підвищення ефективності використання палива при виробництві теплової та електричної енергії. Це не тільки економить паливо, але й зменшує викиди забруднюючих речовин і вуглекислого газу як основного парникового газу. Одним із способів зростання ККД котла є використання паливних добавок, які сприяють інтенсифікації процесу згоряння палива. Для підвищення ефективності парового котла на природному газі використано каталітичну паливну REDUXCO, яка прискорює процес ланцюгового згоряння оксиду вуглецю та інших газів. На Каунаській ТЕЦ (Литва) проведено промислові випробування парового газового котла паропродуктивністю 420 т/год з метою перевірки доцільності використання паливної добавки REDUXCO для підвищення ККД котла. Загальний ККД котла визначався прямим балансом шляхом вимірювання кількості виробленої енергії, переданої в пару, та енергії спаленого природного газу. Введення каталітичної паливної добавки в первинне повітря призвело до збільшення ККД бруто газового котла з 93,4% до 94,88%. Збільшення ККД котла на 1,48% відповідає відносному зменшенню викидів вуглекислого газу на 1,56%. Зниження температури димових газів на виході зі 143°C до 137°C за 7 діб промислових дослідів засвідчило інтенсифікацію спалювання палива в зоні пальника та очищення поверхонь нагріву від частинок сажі в камері паливній та конвективній шахті. Інтенсифікація спалювання природного газу в паливній при використанні паливної добавки не призвела до збільшення емісії оксидів азоту. Це є наслідком зниження надлишку повітря в паливній. Викид оксиду вуглецю при подачі каталітичної присадки до палива залишився на низькому рівні близько 10 ppm.

**Ключові слова:** паливна добавка, паровий котел, природний газ, ефективність, зниження викидів.

**Климась Р.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Ніжник В.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Несенюк Л.П.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Середа Д.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## ДО ПИТАНЬ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРИПИНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ СИСТЕМОЮ ВОГНЕПЕРЕШКОДЖАННЯ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

*У статті розглянуто економічний ефект під час впровадження методу прогнозування припинення та поширення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції, як основи вдосконалення конструктивних рішень під час проектування маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що мають забезпечувати охолодження масла нижче температури спалаху. Одним з найбільш пожежонебезпечних видів обладнання на будь-якій електростанції є трансформатори, які можуть містити значну кількість мінерального масла, яке є горючою речовиною. Масло у таких установках використовується у якості охолоджувача, тобто в аварійних випадках може призвести до перегріву масла, що у свою чергу призводить до його кипіння, підвищення тиску та може спричинити руйнування корпусу трансформатора із аварійним розливом масла з подальшим його займанням. Розливання киплячого трансформаторного масла та його горіння сприяє подальшому розвитку пожежі та спричиняє її поширення територією підприємства та на суміжні об'єкти, що у свою чергу призводить до значних фінансових втрат. Припинення й обмеження поширення горіння трансформаторного масла досягається використанням системи вогнеперешкодження із застосуванням гравійної засипки по всій площі технологічного майданчика, що є економічно затратним і складним у реалізації. Запропоноване зменшення геометричних розмірів гравійної засипки в маслоприймачі дозволить зменшити експлуатаційні витрати на технічне обслуговування трансформаторної підстанції при збереженні належного рівня пожежної безпеки. У ході досліджень, направлених на збільшення економічного ефекту, розроблено методичну базу, направлену на обґрунтування для створення нормативно-правового забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача, як наслідок сформульовано пропозиції щодо внесення змін до Правил улаштування електроустановок. Зокрема пропонується визначений ухил дна маслоприймача та вимоги щодо матеріалу засипки та висоти гравійної засипки.*

**Ключові слова:** гравійна засипка, маслонаповнені трансформатори, маслоприймач, охолодження масла, припинення горіння, трансформаторна підстанція, економічна ефективність.

**Постановка проблеми.** Аналіз інформаційно-аналітичних матеріалів Міністерства енергетики України за останні п'ять років вказує, що кожного року близько половини пожеж виникає на підприємствах електричних мереж. Статистичні дані про пожежі свідчать, що 56 % пожеж в енергетичній галузі припадає на трансформаторне обладнання; як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його

загорянням, що становлять значні матеріальні збитки для економіки як в цілому для держави, та і окремих господарств.

Трансформатори, як один із найбільш пожежонебезпечних видів обладнання на будь-якій електростанції, можуть містити від 200 л до 60 000 л мінерального масла, що є горючою речовиною із густиною в діапазоні  $(0,80-0,89) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Масло у таких установках використовується у якості охолоджувача,

тобто у випадку аварійної ситуації або порушення регламенту технологічного процесу може виникнути перегрівання масла до температури більше  $250^{\circ}\text{C}$ , що призводить до його кипіння, підвищення тиску та може спричинити руйнування корпусу трансформатора із аварійним розливом масла з подальшим його займанням. Розливання киплячого трансформаторного масла та його горіння сприяє подальшому розвитку пожежі та спричиняє її поширення територією підприємства та на суміжні об'єкти, що у свою чергу призводить до значних фінансових втрат.

Припинення й обмеження поширення горіння трансформаторного масла досягається застосуванням системи вогнеперешкоджання, що складається з маслоприймача, масловідводів і вогнезагороджувача, в якості якого використовується маслосбірник із металевою решіткою, поверх якої улаштовано гравійну засипку.

Найбільш поширеним і застосовуваним на практиці унормованим заходом щодо попередження розвитку таких пожеж є встановлення маслонеповнених трансформаторів у маслоприймачі з гравійною засипкою по всій площі технологічного майданчику, що на сьогоднішній день немає відповідного наукового обґрунтування, та, як наслідок, є економічно затратним і складним у реалізації. Це встановлює необхідність наукового обґрунтування оптимальних параметрів гравійної засипки маслоприймачів, як підґрунтя для припинення горіння трансформаторного масла та його охолодження нижче температури спалаху з метою мінімізації фінансово-економічних витрат.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблеми надійності потужних силових трансформаторів розглянуто у роботах Соколова В.В. [1]. Над підвищенням надійності трансформаторів на АЕС України працює Зозуля Д.В., зокрема, дослідження їх аварійності [2] дозволили визначити «зони ризику» обладнання та запропонувати діагностичні методи контролю терміну служби трансформаторного обладнання.

Дослідження надійності силових трансформаторів і наслідків аварійних ситуацій, пов'язаних із вибухами силових трансформаторів, висвітлено у працях Н. Berg і N. Fritze [3, 4], які відзначають, що останніми роками ймовірність відмов трансформаторів зростає через їх старіння чи зовнішні небезпеки. Запобіганням розривів резервуарів силових трансформаторів присвячена доповідь М. Foata і J.-В. Dastous [5].

Питанням прогнозування строку служби та ресурсу ізоляції присвячені праці Полякова М.А. та Василевського В.В. [6, 7].

З урахуванням викладеного, проведення досліджень, спрямованих на розкриття закономірностей зниження температури трансформаторного масла від параметрів гравійної засипки маслоприймача, стане підґрунтям для підвищення ефективності системи вогнеперешкоджання маслонеповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі, що є актуальним науковим завданням з точки зору підвищення безпеки держави.

**Мета роботи** полягає у виявленні економічного ефекту шляхом охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції, як основи вдосконалення наявних конструктивних рішень під час проектування маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що мають виконувати функцію припинення горіння та забезпечувати охолодження масла нижче температури спалаху.

**Виклад основного матеріалу.** Оцінювання економічного ефекту від запропонованих параметричних рішень порівняно з існуючими підходами проведено для міста Києва із офіційною кількістю абонентів станом на 2018 рік в 1,16 млн відповідно до даних [8].

Відповідно до цих даних загальна кількість трансформаторних підстанцій ( $K_T$ ) становить 3569 од., при цьому забезпечує їх обслуговування ( $K_{\text{п}}$ ) 3116 осіб із числа технічного персоналу із середньою заробітною платою (ЗП) 14,900 грн на особу/місяць (745 грн/роб. день). Тобто на одну трансформаторну підстанцію в середньому приходиться ( $K_C$ ) 1,15 працівника, із числа технічного персоналу на рік.

Відповідно до вимог [9] зміна гравійної засипки або її промивка відбувається один раз на рік. Слід розуміти, що відповідно до встановлених вимог роботи з промивки гравійної засипки неможливо проводити безпосередньо на трансформаторному майданчику. Під час організації проведення робіт з промивки гравійної засипки її повністю вилучають та вивозять на спеціальні промивні площадки для подальшого промивання, висушування та транспортування назад для заповнення маслоприймачів. Загальна тривалість такої роботи становить 7 днів, із якої 2 дні є трудовими ( $T_{\text{роб}}$ ) та безпосередньо займають на здійснення процесу транспортування та промивки, а 5 днів – сушіння на відкритій площадці.

Проведемо порівняльний аналіз доцільності здійснення промивки гравійної засипки ( $G_{\text{промивки}}$ ) або її повного вилучення та засипки нової гравійної засипки ( $G_{\text{заміни}}$ ) за допомогою виразів (1) та (2):

$$G_{\text{промивки}} = K_c \cdot T_{\text{роб}} \cdot 3П + (E_T + E_B + E_H) \cdot 116, \quad (1)$$

де:  $K_c$  – середня кількість працівників залучених в рік (1,15);

$T_{\text{роб}}$  – кількість робочих днів (2);

$3П$  – середня заробітна палата за один робочий день (745 грн);

$E_T$  – затрати на транспортування 1 т вантажу на 1 км (170 грн);

$E_B$  – затрати на подачу та відведення води промивки 1 т щебеню (35 грн);

$E_H$  – витрати на експлуатацію насосного обладнання промивки 1 т щебеню (12 грн).

Таким чином  $G_{\text{промивки}}$  для однієї трансформаторної підстанції становить 26885,5 грн на рік. Витратами на вилучення та засипання гравійної засипки в даному випадку можна знехтувати, враховуючи, що даний тип роботи присутній для обох типів експлуатації трансформаторів маслоприймачів.

Проведемо розрахунки вартості повного вилучення та засипки нової гравійної засипки ( $G_{\text{заміни}}$ ):

$$G_{\text{заміни}} = K_c \cdot T_{\text{роб}} \cdot 3П + (E_T + E_y + E_{ГЗ}) \cdot 116, \quad (2)$$

де:  $E_y$  – затрати на утилізацію 1 т забрудненого щебеню (20 грн/т);

$E_{ГЗ}$  – затрати на закупівлю нової гравійної засипки (305 грн/т).

Таким чином  $G_{\text{промивки}}$  для однієї трансформаторної підстанції становить 59133,5 грн на рік.

За результатом проведених розрахунків за формулами (1) та (2) визначено, що щорічні витрати на експлуатаційне обслуговування одного маслоприймача

трансформаторних підстанцій складає 26885,5 грн на рік – у разі промивки щебеню, та 59133,5 грн на рік – у разі повної заміни гравійної засипки.

Таким чином, загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі промивки щебеню можна виразити рівнянням (3):

$$\sum E = K_T \cdot G_{\text{промивки}}, \quad (3)$$

Загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі заміни щебеню можна виразити рівнянням (4):

$$\sum E = K_T \cdot G_{\text{заміни}}, \quad (4)$$

Тобто загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті в разі промивки щебеню складатимуть 95 954 349,5 грн, а загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі заміни щебеню складатимуть 211 047 461,5 грн, тобто промивання гравійної засипки є на 45 % вигіднішим, ніж його заміна на новий.

Візуально зменшення кількості щебеню зображено на рисунку 1.

Маса гравійної засипки, що використовується для заповнення однієї площадки за нормованими параметрами в середньому становить 86,4 м<sup>3</sup> або 116 т.

Маса гравійної засипки, що використовується для заповнення однієї площадки за розрахованими параметрами в середньому становить 5,4 м<sup>3</sup> або 7 т.

Із урахуванням отриманих нових параметрів гравійної засипки маслоприймачів та відповідно зміни її кількості з 116 тон до 7 тон проведемо аналогічні розрахунки за формулами (1) та (2)

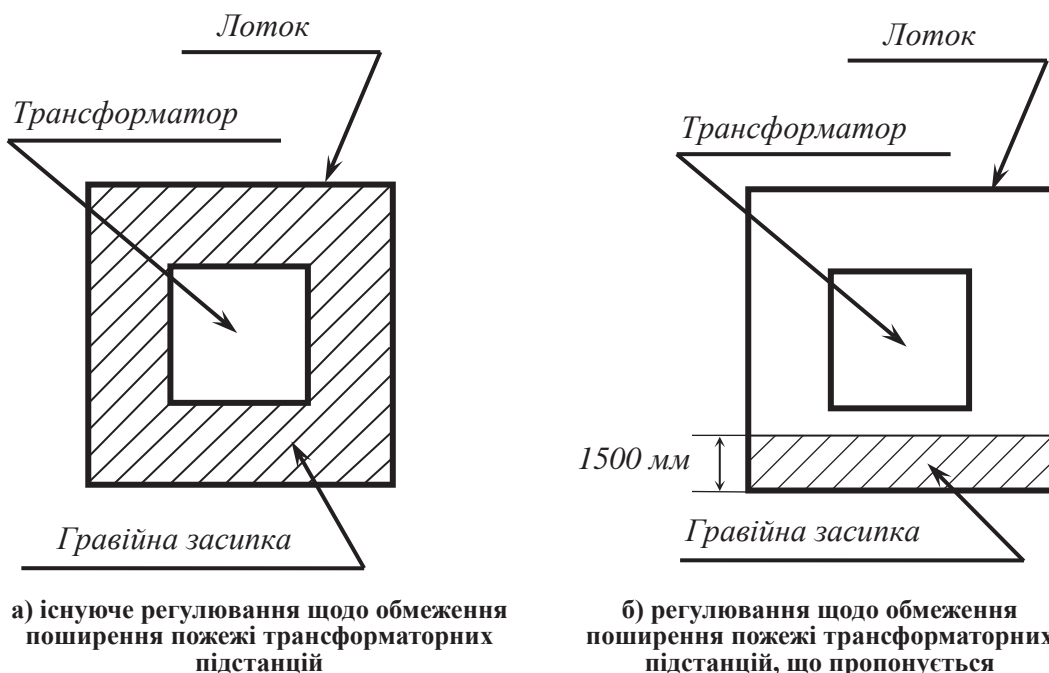


Рис. 1. Схеми маслонаповнених трансформаторних підстанцій із гравійною засипкою

та визначимо, що вартість промивки 1 т щебеню  $G_{\text{промивки}}$  складатиме 3232,5 грн, а вартість заміни  $G_{\text{заміни}}$  – 4478,5 грн. Таким чином, економічний ефект від зміни параметрів гравійної засипки одного маслоприймача на прикладі трансформаторних підстанцій міста складатиме до 72 %.

Зменшення геометричних розмірів гравійної засипки в маслоприймачі зменшує експлуатаційні витрати на технічне обслуговування трансформаторної підстанції при збереженні рівня пожежної безпеки. В Україні вимоги щодо непоширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях наведені у Правилах улаштування електроустановок [9], а саме зазначено, що на території відкритих розподільчих установок і підстанцій, на яких у нормальних умовах експлуатації із маслонаповнених силових трансформаторів і вимикачів у період проведення ремонтних та інших робіт можуть траплятися випадки витікання масла, потрібно передбачати пристрої для збирання і видалення масла для унеможливлення розтікання його по території і попадання у водойми.

Підпунктом 4.2.67 [9] передбачено, що для запобігання розтіканню масла і поширенню пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів (шунтувальних реакторів) з кількістю масла понад 1 т в одиниці (в одному баку) потрібно застосовувати маслоприймачі з відведенням масла масловідводами в маслосбірники. Для трансформаторів (реакторів) потужністю до 10 МВ·А і маслонаповнених бакових вимикачів на напругу 110 кВ і вище дозволено виконувати маслоприймачі без відведення масла.

Маслоприймачі з відведенням масла може бути виконано як заглибленого типу (дно – нижче рівня навколишнього планування землі), так і незаглибленого типу (дно – на рівні навколишнього планування землі). Незаглиблений маслоприймач потрібно виконувати у вигляді бортових огорож маслонаповненого електроустановки. Висота бортових огорож повинна бути не менше ніж 0,25 м і не більше ніж 0,5 м над рівнем навколишнього планування землі. У разі виконання заглибленого маслоприймача облаштування бортових огорож дозволено не виконувати. Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м. Верхній рівень гравію (щебеню) повинен

бути не менше ніж на 7,5 см нижче від верхнього краю борта (у разі улаштування маслоприймачів з бортовими огороженнями) або рівня навколишнього планування (у разі улаштування маслоприймачів без бортових огорожень). Дозволено не засипати дно маслоприймачів по всій площі гравієм. У цьому разі на системах відведення масла від трансформаторів (реакторів) потрібно передбачати установлення вогнезагороджувачів.

Маслоприймачі без відведення масла в маслосбірник потрібно виконувати заглибленої конструкції з металевою решіткою, поверх якої потрібно насипати шар чистого гравію, промитого гранітного щебеню або непористого щебеню іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм товщиною, не менше ніж 0,25 м. Крім того потрібно передбачати пристрої для видалення масла і води з маслоприймачів і контролю наявності масла і води в маслоприймачі.

Облаштування маслоприймачів і масловідводів повинне унеможливити витікання масла чи масловодяної емульсії з одного маслоприймача в інший, розтікання масла по кабельних та інших підземних спорудах, поширення пожежі, засмічення масло відводу і забивання його снігом, льодом тощо. Масловідводи повинні забезпечувати відведення з маслоприймача масла і води, застосовуваної для гасіння пожежі автоматичними стаціонарними установками, в об'ємі 50 % масла і повного об'єму води за час, не більший ніж 15 хв на безпечну в пожежному відношенні відстань від устаткування і споруд (але не меншу ніж 10 м). Масловідводи дозволено виконувати у вигляді підземних трубопроводів або відкритих кюветів і лотків.

Проведені теоретичні та експериментальні наукові дослідження в даній роботі [10, 11, 12] виявили можливість зміни умов розміщення гравійної засипки та її геометричних параметрів без зміни розміру фракції гравійної засипки та конструкції маслоприймача.

При цьому необхідно дотримуватися таких умов:

- дно маслоприймача, що засипається повинне мати ухил, не менше ніж 0,05 м/м, у бік приямка та бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм;

- висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м.

Підшириною гравійної засипки слід вважати відстань від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів

улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслосбірник для аварійного зливу.

За результатами проведених досліджень розроблено методичну базу, що є підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

У результаті чого сформульовано пропозиції щодо внесення змін до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), а саме: вважаємо за доцільне дев'ятий абзац п. 4.2.67 [9] викласти в такій редакції:

«Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,05 м/м, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. При цьому, висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м. Під шириною гравійної засипки слід вважати відстань

від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслосбірник для аварійного зливу».

**Висновки.** Економічний ефект від запропонованих технічних рішень порівняно з існуючими підходами за розрахунком техніко-економічного обґрунтування параметрів гравійної засипки у маслоприймачах маслонаповнених трансформаторних підстанцій на прикладі довготривалої експлуатації для міста Києва, з урахуванням зменшення кількості щебеню й експлуатаційних витрат, складає до 72 %.

На основі отриманих результатів досліджень розроблено методичну базу, що є підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача. У результаті чого сформульовано пропозиції щодо внесення змін до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).

#### Список літератури:

1. Соколов В.В. Проблеми надійності потужних трансформаторів після тривалої експлуатації. Трансформаторобудування: Тези доповідей XI міжнародної наук.-техн. конф. Запоріжжя: ПАТ ВІТ, 2005. С. 12-15.
2. Зозуля Д.В. Розробка та наукове обґрунтування технічних пропозицій щодо підвищення надійності, енергетичної ефективності та продовження ресурсу трансформаторів ТНЦ-1250000/330 на блоках АЕС України. Збірник: Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. Чорнобиль: вип. 20, 2013. С. 57-67.
3. Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze Reliability and vulnerability of transformers for electricity transmission and distribution. Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars. Vol. 6, № 3, 2015. Pp. 15-24.
4. Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze Risk and Consequences of Transformer Explosions and Fires in Nuclear Power Plants. Journal of KONBiN. Warszawa: No. 3 (23), 2012. Pp. 5-16. DOI: <https://doi.org/10.2478/jok-2013-0034>.
5. Marc Foata, Jean-Bernard Dastous Power Transformers Tank Rupture Prevention, CIGRÉ Session. Paris, 2010.
6. Поляков М.А., Василевський В.В. Оцінка залишкового ресурсу ізоляції з урахуванням обліку індивідуальних особливостей життєвого циклу силового трансформатора. Електротехніка і електромеханіка. Харків: № 3, 2014. С. 33-36.
7. Поляков М.А., Андріяс І.С., Конограй С.П., Василевський В.В. Когнітивне керування життєвим циклом ізоляції обмоток маслонаповненого силового трансформатора. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків: № 5 (1281), 2018 С. 90-96.
8. План розвитку електричних мереж оператора системи розподілу ПРАТ «ДТЕК Київські електромережі» на 2020-2024 роки / технічний звіт, 2019. 208 с.
9. Правила улаштування електроустановок. К.: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
10. Klymas R., Nizhnyk V., Nekora O., Nekora V., Stylyk I. Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation [Обґрунтування мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції]. The Scientific heritage. Budapest, Hungary: vol. 1, № 79 (79), 2021. Pp. 36-44. DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-1-36-44>.
11. Климаць Р.В., Ніжник В.В., Балло Я.В., Хроменков Д.Г., Гулик Ю.Б., Ільченко Н.М. Методика експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. Науково-технічний збірник: Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура. Харків: т. 4, вип. 164, 2021. С. 158-165. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-158-165>.
12. IEC 60296:2003 Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear [міжнародний стандарт: Рідини для застосування в електротехніці. Невикористані нафтові ізоляційні масла для трансформаторів і вимикачів]. Edition 3.0, 2003-11. IEC, 2003. 23 p.

---

**Klymas R.V., Nizhnyk V.V., Nesenyuk L.P., Sereda D.V. ON THE ISSUES OF THE ECONOMIC EFFECT DURING THE IMPLEMENTATION OF THE METHOD FOR PREDICTING THE STOPPING AND SPREAD OF THE FIRE PREVENTION SYSTEM AT OIL-FILLED TRANSFORMER SUBSTATIONS**

*The article considers the economic effect during the implementation of the method of predicting the termination and spread of transformer oil burning depending on the parameters of the gravel backfill of the fire protection system of the transformer substation, as a basis for improving constructive solutions during the design of oil receivers of transformer substations, which should ensure oil cooling below the flash point. One of the most fire-hazardous types of equipment in any electrical substation are transformers, which can contain significant amounts of mineral oil, which is a combustible substance. Oil in such installations is used as a coolant, that is, in emergency cases, it can lead to overheating of the oil, which in turn leads to its boiling, increased pressure, and can cause the destruction of the transformer housing with an emergency spill of oil, followed by its ignition. Spilling of boiling transformer oil and its burning contributes to the further development of the fire and causes it to spread throughout the territory of the enterprise and to adjacent objects, which in turn leads to significant financial losses. Stopping and limiting the spread of burning transformer oil is achieved by using a fire prevention system with the use of gravel filling over the entire area of the technological site, which is economically costly and difficult to implement. The proposed reduction of the geometric dimensions of the gravel filling in the oil receiver will allow to reduce the operating costs for maintenance of the transformer substation while maintaining the appropriate level of fire safety. In the course of research aimed at increasing the economic effect, a methodological base was developed, aimed at substantiation for the creation of legal support for determining the minimum parameters of the gravel filling of the oil receiver, as a result, proposals were formulated for making changes to the Rules for the arrangement of electrical installations. In particular, a defined slope of the bottom of the oil receiver and requirements for the backfill material and the height of the gravel backfill are proposed.*

**Key words:** gravel backfill, oil-filled transformers, oil receiver, oil cooling, cessation of combustion, transformer equipment, economic efficiency.

**Слободянюк М.В.**

Інститут Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

**Нікольський В.В.**

Національний університет «Одеська морська академія»

**Нікольський М.В.**

Національний університет «Одеська морська академія»

## ОЦІНКА МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА СУДНОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

*Гідродинамічні процеси в системах впорскування палива дизельних двигунів є актуальним предметом дослідження, оскільки вони значною мірою визначають всі експлуатаційні параметри дизелів.*

*В Національному університеті Одеська морська академія виконано експериментальне дослідження процесу паливоподачі дизельної паливної апаратури на несталих та часткових режимах. Досліди проводилися на безмоторному стенді, який було обладнано програмно-апаратним комплексом реєстрації паливоподачі та програмно-апаратним електромеханічним комплексом управління положенням рейки паливного насоса високого тиску, що дало можливість отримати експериментальні параметри гідродинамічних процесів у паливній апаратурі суднового середньообертового дизеля в динамічному режимі.*

*Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску під час роботи на навантажувальній характеристиці. Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів паливоподачі з режимними та регульовальними факторами, а також статистичні характеристики отриманих регресійних моделей.*

*У роботі представлені результати моделювання характеристик системи паливоподачі суднового середньообертового дизеля у формі статистичних залежностей основних показників впорскування від регульовальних та експлуатаційних параметрів. Сформовані регресійні моделі відображають взаємозв'язок параметрів процесу впорскування для навантажувальної характеристики суднового середньообертового дизеля.*

*Проведене дослідження вказує на статистичну значимість представлених моделей (кута впорскування, тиску палива в штуцері паливного насоса, тиску в паливному каналі форсунки від частоти обертання розподільного валу та положення рейки паливного насоса високого тиску) та їх придатність для оцінки навантажувальної характеристики суднового середньообертового дизеля.*

**Ключові слова:** середньообертовий дизель, паливна апаратура, змінні режими, навантажувальна характеристика, гідродинамічні процеси, динамічні випробування, статистичні моделі.

**Вступ.** Дослідження процесів впорскування палива виконуються різними методами. Поряд із традиційними формами подання результатів експериментальних даних, які виконані у графічному вигляді та у формі аналітичних моделей, є ефективною статистична обробка даних у вигляді регресійних залежностей. Такий підхід використаний у даній роботі під час аналізу результатів вимірювання параметрів паливоподачі суднового середньообертового дизеля, які були отримані під час динамічних безмоторних стендових випробувань. Умови експерименту відповідали навантажувальній характеристиці. Обробку даних з розрахунком статистик регре-

сійних рівнянь здійснено за допомогою пакета STATISTICA.

**Постановка проблеми.** Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску під час роботи на навантажувальній характеристиці.

*Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів паливоподачі з режимними та регульовальними факторами, а також статистичні параметри отриманих регресійних моделей.*

Дослідження проведено на безмоторному стенді в умовах динамічних випробувань, з використанням створеного вимірювального та електромеханічного комплексу, з комп'ютерним



керуванням режимів експерименту та записом параметрів паливоподачі.

Обробку експериментальних даних та підготовку масивів інформації для пакету статистичного аналізу проведено засобами вимірювального комплексу.

За даними статистичного аналізу визначено кращу форму регресійних моделей.

*Метою дослідження є одержання математичної моделі процесів у паливній системі високого тиску для навантажувальної характеристики судового середньооборотного дизеля.*

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- підготувати вихідний матеріал для статистичної обробки за допомогою використаних експериментальних даних, які отримані авторами в роботі [1];

- сформулювати регресійні рівняння залежності кута впорскування, тиску палива в насосі високого тиску (ПНВТ), тиску в паливному каналі форсунки від положення рейки та швидкості обертання розподільного валу з оцінкою статистичних характеристик отриманих моделей.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

У роботах [2–5] досліджено динамічні характеристики транспортного дизеля, що працює в умовах змінних навантажень. Суднові дизелі у багатьох випадках також експлуатуються при частій зміні навантаження – пуски, зупинки, реверс, вплив поривів вітру, ударні дії хвиль. При цьому мінімальний час прийому навантаження є важливим фактором керованості судна. Проведений аналіз впливу характеру зміни початкового тиску в системі паливоподачі на тривалість перехідного процесу довів, що параметри перехідного процесу в паливній апаратурі дизеля можуть позитивно або негативно впливати на динамічні якості дизеля.

У роботах [6–8] проведено оцінку економічності дизеля на несталіх режимах роботи. За результатами обробки експлуатаційних та експериментальних даних перевищення витрати палива на перехідному режимі при навантаженні, у порівнянні зі сталим режимом, складає 43 %, а в режимі холостого ходу – 25 %.

Наведені дані свідчать про важливість процесів паливоподачі під час формування динамічних характеристик дизелів. Це підтверджує доцільність досліджень, результати яких представлені авторами у статті, включаючи встановлення статистичних закономірностей для параметрів впорскування палива.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальні показники паливоподачі, які використані

для статистичної обробки, отримані в результаті динамічних випробувань за характеристикою навантаження системи впорскування дизеля 6СН25/34 на безмоторному стенді [9]. Загальний вигляд стенду із встановленою паливною апаратурою та датчиками для реєстрації параметрів впорскування представлені на рис. 1.



**Рис. 1. Безмоторний стенд для дослідження паливної апаратури: 1 – форсунка; 2 – паливний насос високого тиску (ПНВТ); 3 – пристрій, що керує переміщенням рейки ПНВТ; 4 – електродвигун; 5 – станція управління електродвигуном**

Безмоторний стенд обладнано комп'ютерно-інтегрованою системою у складі:

- програмно-апаратного комп'ютерного комплексу реєстрації паливоподачі;

- програмно-апаратного електромеханічного комплексу управління положенням рейки ПНВТ.

Під час експериментального дослідження вимірювальною системою реєструвалися:

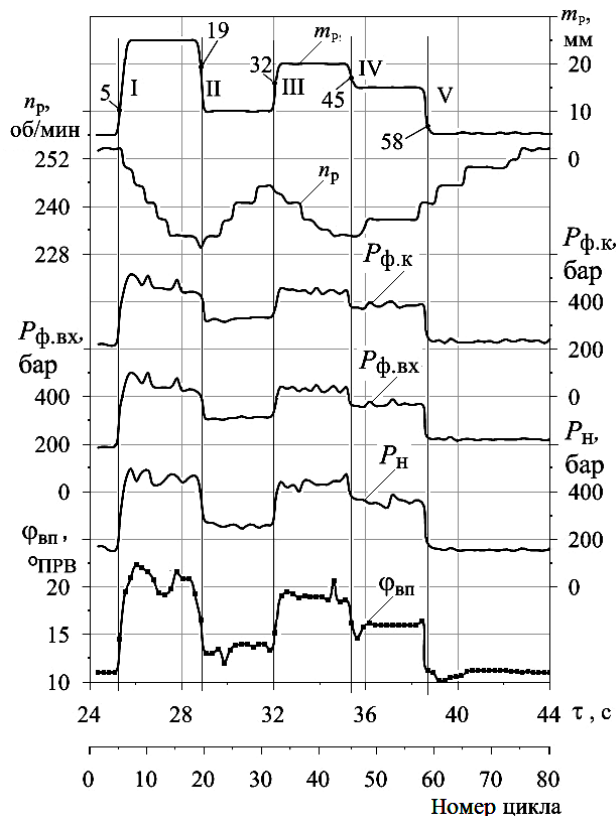
- тиск палива в штуцері паливного насоса  $p_{пн}$ ;
- тиск палива на вході у форсунку  $p_{ф.вх}$ ;
- тиск у паливному каналі форсунки  $p_{ф.к}$ ;
- хід голки розпилувача (форсунки)  $z$ ;
- визначалася частота обертання розподільного валу  $n_p$ ;
- фіксувався кут повороту розподільного валу  $\varphi$ ;
- вимірювався час  $t$ ;
- переміщення рейки ПНВТ  $m_p$ .

Навантажувальна характеристика отримана шляхом ступінчатого переміщення рейки ПНВТ при постійній напрузі електродвигуна на безмоторному стенді відповідно до заданої циклограми.

Методика дослідження включає статистичний аналіз параметрів навантажувальної характеристики.

Статистичний аналіз гідродинамічних показників впорскування палива, які були отримані під час динамічних випробувань за навантажувальною характеристикою, виконано за експериментальними даними, які наведені в [1].

Графічне зображення ходу експерименту відображено на графіках рис. 2. Використана шкала часу вказує на момент запису показників та одночасно вказується номер циклу комп'ютерної осцилограми.



**Рис. 2. Параметри подачі палива на режимах навантажувальної характеристики під час динамічних випробувань:**  
**I –  $m_p = 5-25$  мм; II –  $25-10$  мм; III –  $10-20$  мм;**  
**IV –  $20-15$  мм; V –  $15-05$  мм;**  
**5, 19, 32, 45, 58 – нумерація циклів під час переміщення рейки ПНВТ**

Параметри експериментального дослідження отримані, як зазначено вище, в умовах динамічних випробувань при постійній нарузі електродвигуна безмоторного стенда.

У результаті коливання навантаження, яке викликає переміщенням рейки ПНВТ, спостерігалася деяка зміна частоти обертання розподільного валу.

Межі зміни частоти обертання  $n_p$  склали  $233 \div 255$  об/хв, що відповідає 9 % або  $\pm 4,5$  % від середнього значення.

Для вирішення питання про статистичну значущість зміни обертів  $n_p$  в отриманому діапазоні

проведено аналіз спільного впливу положення рейки  $m_p$  та  $n_p$  на величину кута впорскування  $\phi_{вп}$ . Їх взаємозв'язок описаний двофакторним регресійним лінійним рівнянням

$$\phi_{вп} = 7,4168 + 0,49322m_p + 0,0050825n_p.$$

Статистичні параметри моделі представлені у табл. 1 та 2. Для оцінки значущості частоти обертання розглянемо два показники: рівень значимості –  $p$  і критерій Стьюдента  $t$ .

Позначення, що використовуються в таблицях (програмне забезпечення STATISTICA, версія 5):

– Ефект – члени рівняння регресії та помилка (залишків);

– Параметр – коефіцієнти при факторах;

– SS (Sums of Squares) – сума квадратів відхилень значень від середнього для моделі чи ефекту;

– SS моделі – сума квадратів відхилень передбачуваних значень від середнього;

– SS залишок – сума квадратів відхилень залишків від середнього за залишками;

– MS (Mean of Squares) – дисперсія, сума квадратів відхилень, що припадає на одну ступінь свободи;

– Множин.  $R$  – коефіцієнт множинної кореляції;

– Множин.  $R^2$  – коефіцієнт детермінації;

– Скоригов.  $R^2$  – скоригований  $R^2$  на число членів у регресійному рівнянні;

– Ст. Пом. – стандартна помилка, міра розсіювання значень, що спостерігається щодо лінії регресії, а також оцінки якості параметрів;

–  $t$  – критерій Стьюдента, що використовується для оцінки статистичної значущості параметрів рівняння;

–  $F$  – критерій Фішера, який використовується для перевірки значущості регресійної моделі та значущості ефектів;

–  $p$  – рівень значимості є ймовірністю помилки, тому що зв'язок між змінними є лише випадковою особливістю даної вибірки;

–  $ss$  – число ступенів свободи для відповідного ефекту.

Оцінка значимості складових моделей проводиться шляхом порівняння, розрахованого  $t$  – критерію Стьюдента з табличним значенням. Аналізу підлягають коефіцієнт регресії та вільний член. При цьому розраховується помилка відповідного параметра, а потім визначається величина  $t$ , як відношення значення параметра до помилки. Для лінійного однофакторного рівняння – це  $t_a = a/m_a$ ,  $t_b = b/m_b$ , де  $t_a$ ,  $t_b$  – розрахункові статистики для вільного члена та коефіцієнта регресії,  $b$  – коефіцієнт регресії,  $a$  – вільний член. Перевищення фактичного (розрахункового) значення над

Таблиця 1

Одновимірні критерії значущості для $\varphi_{вп}$					
Ефект	SS	Ступені свободи	MS	F	p
Вільний член	1,6728	1	1,6728	9,561	0,003074
$m_p$	438,8614	1	438,8614	2508,426	0,0
$n_p$	0,0494	1	0,0494	0,2823	0,597274
Помилка	9,9724	57	0,1750	–	–

Таблиця 2

Оцінки параметрів				
Ефект	$\varphi_{вп}$ Парам.	$\varphi_{вп}$ Ст.Пом.	$\varphi_{вп}$ t	$\varphi_{вп}$ p
Вільний член	7,4168	2,39861	3,0921	0,0307
$m_p$	0,4932	0,00985	50,0842	0,0
$n_p$	0,0051	0,00957	0,5313	0,5313

Таблиця 3

Одновимірні критерії значущості для $p_n$					
Ефект	SS	Ступені свободи	MS	F	p
Вільний член	425,0	1	425,0	4,097	0,047655
$m_p$	104825,3	1	104825,3	1010,448	0,0
$m_p^2$	23519,2	1	23519,2	226,710	0,0
Помилка	5913,3	57	103,7	–	–

Таблиця 4

Оцінки параметрів					
Ефект	$p_n$ Парам.	$p_n$ Ст.Пом.	$p_n$ t	$p_n$ p	$p_n$ Ст.Пом.2
Вільний член	12,454	6,15327	2,0241	0,047655	–
$m_p$	30,272	0,95234	31,7875	0,0	0,057681
$m_p^2$	-0,474	0,03148	-15,0569	0,0	0,057681

Таблиця 5

SS моделі та SS залишків для $p_n$										
Залежна змінна	Множин. R	Множин. R2	Скоригов. R2	SS моделі	сс моделі	MS моделі	SS залишку	MS залишку	F	p
$p_n$ , бар	0,9964	0,9928	0,9925	810051	2	405025	5913,2	103,7	3904,2	0,0

табличним свідчить про значущість параметра моделі, що розглядається.

Критерій Фішера ( $F$  – статистика) є ставленням дисперсії моделі до дисперсії помилки та характеризує наскільки модель добре пояснює загальну дисперсію даних. Оцінка значимості моделі також здійснюється порівнянням фактичного (розрахункового) і табличного значення  $F$ .

Оцінюючи значущість зміни  $n_p$  у рівнянні  $\varphi_{вп}$  за величиною  $p = 0,597$ , відзначимо його невідповідність до заданого рівня  $p = 0,05$ . Такий самий висновок можна зробити з порівняння величини  $t = \sqrt{F} = \sqrt{0,2823} = 0,531$  та відповідного табличного  $t_{табл} = 12,7$  (табл. 2).

Таким чином, вплив коливання частоти обертання на кут впорскування незначний і подаль-

ший аналіз слід проводити для одного фактора навантажувальної характеристики – положення рейки ПНВТ  $m_p$ .

Аналогічні результати отримані і для інших параметрів паливоподачі:

- кута впорскування  $\varphi_{вп}$  ( $m_p$ );
- тиску палива в штуцері паливного насоса  $p_n$  ( $m_p$ );
- тиску в паливному каналі форсунки  $p_{ф.к}$  ( $m_p$ ).

Попередня візуальна оцінка значень, що спостерігаються,  $p_n$  залежно від  $m_p$  виявила явну нелінійність. Це стало підставою для застосування до опису статистичних зв'язків однофакторної моделі другого порядку у формі регресійного рівняння  $p_n = f(m_p, m_p^2)$ .

Для шуканого взаємозв'язку отримана наступна однофакторна модель другого порядку:

$$p_n = 12,454 + 30,272m_p - 0,47403m_p^2.$$

Статистичні параметри даного регресійного рівняння наведені у таблицях 3 (Одновимірні критерії значущості для  $p_n$ ), 4 (Оцінка параметрів), 5 ( $SS$  моделі та  $SS$  залишків), що характеризує модель загалом.

Критичне табличне значення критерію Фішера  $F_{\text{табл}}$  для інтервалу ступенів свободи 50-60 знаходиться в діапазоні 3,15-3,18. Оскільки фактичний  $F_{\text{факт}}$  моделі (табл. 5) значно більше  $F_{\text{крит}}$  ( $F_{\text{факт}} \gg F_{\text{табл}}$ ), регресійні рівняння вважатимуться значними.

Оцінка точності моделі здійснюється за величиною коефіцієнта детермінації  $R^2$  (скоригованого). Величина  $R^2 = 0,99$  означає, що 99 % загальної дисперсії експериментальних значень пояснюється регресійною залежністю, і 1 % посідає невраховані чинники, зокрема на варіації числа обертів.

Значимість параметрів оцінюється за допомогою критерію Стюдента ( $t$  – статистики), який наведено у табл. 4. Критичне значення  $t$  зна-

диться для даного числа спостережень, числа незалежних змінних та рівня значущості  $t_{\text{табл}}(n-m-1, p)$ , де  $n_p = 60$  – кількість спостережень (обсяг вибірки),  $m_p = 2$  – кількість пояснюючих змінних,  $p = 0,05$ . Знайдене критичне значення знаходиться у діапазоні  $2,00 < t_{\text{крит}} < 2,02$ . Оскільки будь-який з  $t$  – критеріїв у таблиці оцінки параметрів перевищує  $t_{\text{крит}}$ , це означає, що статистична значимість коефіцієнтів підтверджується.

Нижче наведено два графіки, що ілюструють якість аналізованої моделі (рис. 3, 4).

Графік на рис. 3 вказує, що передбачені значення, і ті, що спостерігаються, досить тісно групується навколо лінії рівних значень, що підтверджує хорошу апроксимацію досвідчених даних.

Залежність передбачуваних значень тиску палива у штуцері паливного насоса  $p_n$  від переміщення рейки ПНВТ  $m_p$  наведено на рис. 4 спільно з експериментальними даними.



Рис. 3. Положення значень, що спостерігаються на лінії рівних величин  $p_n$  для навантажувальної характеристики: □ – значення, що спостерігаються

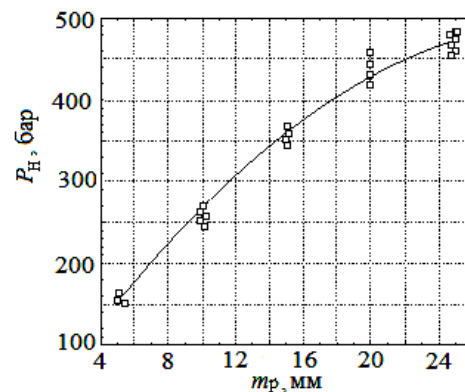


Рис. 4. Графік передбачених значень  $p_n$  залежно від положення рейки ПНВТ і величини  $p_n$ , що спостерігаються: □ – значення, що спостерігаються

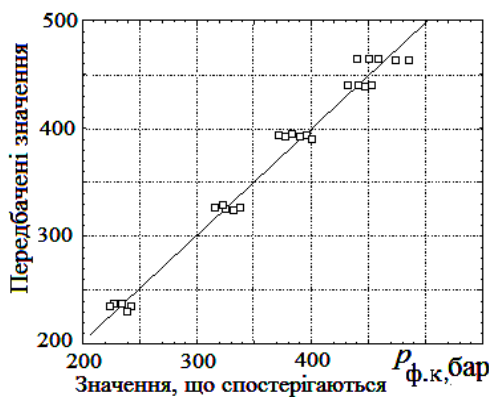


Рис. 5. Положення значень, що спостерігаються на лінії рівних величин  $p_{ф.к}$  для навантажувальної характеристики: □ – значення, що спостерігаються

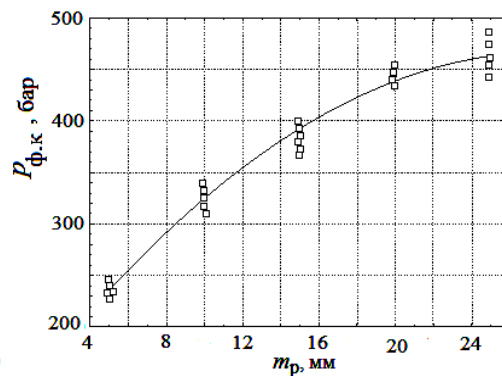


Рис. 6. Графік передбачених значень  $p_{ф.к}$  в залежності від положення рейки ПНВТ і величини  $p_{ф.к}$ , що спостерігаються: □ – значення, що спостерігаються

Таблиця 6

Одновимірні критерії значущості для $p_{ф,к}$					
Ефект	SS	Ступені свободи	MS	F	p
Вільний член	42602,34	1	42602,34	389,59	0,0
$m$	67845,51	1	67845,51	620,43	0,0
$m^2$	19588,27	1	19588,27	179,13	0,0
Помилка	6233,05	57	109,35	–	–

Таблиця 7

Оцінки параметрів				
Ефект	$P_{ф,к}$ Парам.	$P_{ф,к}$ Ст.Пом.	$P_{ф,к}$ t	$P_{ф,к}$ p
Вільний член	124,69	6,3175	19,738	0,0
$m_p$	24,35	0,9778	24,909	0,0
$m_p^2$	-0,43	0,0323	-13,384	0,0

Таблиця 8

SS моделі та SS залишків для $p_{ф,к}$										
Залежна змінна	Множин R	Множин R <sup>2</sup>	Скоригов R <sup>2</sup>	SS моделі	сс моделі	MS моделі	SS залишок	MS залишок	F	p
$p_{ф,к}$	0,9926	0,9853	0,98475	416876	2	208438	6233	109,4	1906	0,0



Рис. 7. Положення значень  $\phi_{вп}$ , що спостерігаються, на лінії рівних величин  $\phi_{вп}$  для навантажувальної характеристики: □ – значення, що спостерігаються

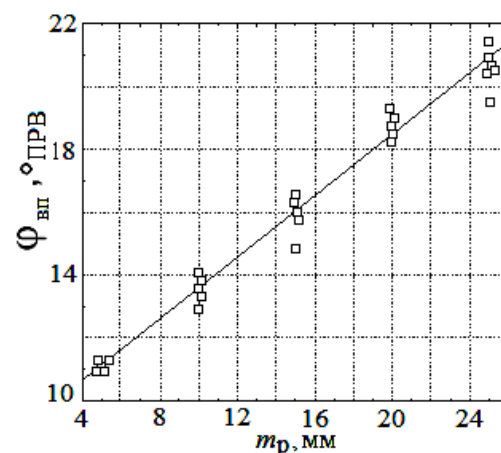


Рис. 8. Графік передбачених значень  $\phi_{вп}$  в залежності від положення рейки ПНВТ і величин  $\phi_{вп}$ , що спостерігаються: □ – значення, що спостерігаються

Наступним завданням в обробці дослідних даних була побудова та аналіз моделі  $p_{ф,к} = f(m_p, m_p^2)$ . Для цієї залежності отримано однофакторне регресійне рівняння другого порядку

$$p_{ф,к} = 124,69 + 24,354m_p - 0,4326m_p^2.$$

Чисельні значення основних статистик рівняння наведено у таблицях 6, 7, 8.

Графічне уявлення отриманих характеристик дано на рисунках 5, 6.

Усі статистики, що характеризує значимість рівняння та його коефіцієнтів, задовольняють критичним значенням F – критерію та t – статистики. Отже, модель тиску палива у форсунці та її параметри значущі.

Для опису статистичного зв'язку кута впорскування  $\phi_{вп}$  та положення рейки ПНВТ виявилось достатньо однофакторної лінійної моделі виду

$$\phi_{вп} = 8,6895 + 0,48992m_p.$$

Графіки рівняння наведено на рисунках 7 та 8. В обох випадках візуальна оцінка свідчить про хорошу збіжність значень  $\phi_{вп}$ , які спостерігаються та передбачаються.

Значення рівняння обґрунтовується високим значенням критерію Фішера, що становить  $F = 411588$ , а для його параметрів величинами t – критерію Стьюдента 70,25 і 64,48. Дуже високі показники мають прогностичні якості моделі.

Дійсно, коефіцієнти кореляції та детермінації близькі до значень 0,99.

**Висновки.** Запропоновано статистичні моделі параметрів паливоподачі суднового середньооборотного дизеля за даними динамічних безмоторних випробувань на режимах навантажувальних характеристик.

Моделі, які побудовані з використанням сучасного інструментарію статистичної обробки дослідних даних (програмний пакет STATISTICA), забезпечують широкі можливості варіювання способів та режимів аналізу експериментального матеріалу. Як базовий

статистичний метод використано регресійний аналіз.

Для навантажувальної характеристики, як моделі тиску палива, використані однофакторні регресійні рівняння другого порядку, а для кута впорскування – першого порядку.

Результати моделювання у поєднанні з додатковим аналізом та порівнянням  $F$  – критеріїв та  $t$  – критеріїв отриманих параметрів з табличними значеннями дозволяють зробити висновок про статистичну значущість усіх моделей та придатність їх для подальшого використання в оцінці гідродинамічних процесів у системі впорскування палива у судновому дизелі.

#### Список літератури:

1. Половинка Е.М., Слободянюк М.В. Навантажувальна характеристика системи впорскування палива суднового середньооборотного дизеля в умовах динамічних випробувань. *Technology audit and production reserves*. – 2018. № 6/1(44). С. 41–49.
2. Патрахальцев Н.Н., Пономарьов М.Н., Савастенко А.А. Вплив перехідних процесів у паливній апаратурі дизеля на його динамічні якості. *Вісник РУДН*. 2003. № 1. С. 15–18.
3. Іванченко А.А., Щенников І.А. Проблеми та досвід математичного моделювання екологічних та експлуатаційних показників суднового високооборотного дизеля М 482. *Вісник Державного університету морського та річкового флоту ім. адмірала С.О. Макарова*. 2016. № 3 (37). С. 166–173.
4. Блинов А.П., Блинов П.Н., Бернс П.А. Розробка математичної моделі спільної роботи паливної апаратури високого тиску та регулятора частоти обертання колінчастого валу дизеля. *Вісник Машинобудування*. 2017. № 3(31). С. 12–22.
5. Троїцький А.В. Комп'ютерне моделювання паливоподачі у судновому середньооборотному чотирьохтактному дизелі. *Морська техніка та технологія*. 2009. № 2. С. 188–191.
6. Овчаренко С.М., Корнеев П.С., Четвергов В.А., Вплив перехідних процесів на витрату палива дизелем в експлуатації. *Вісник вузів*. 2012. № 1(9). С. 27–32.
7. Блинов П.Н., Блинов А.П. Застосування математичної моделі процесу паливоподачі паливною апаратурою тепловозних дизелів для багатоваріантних розрахунків. *Вісник вузів*. 2014. № 3(19). С. 2–7.
8. Коссов Є.Є., Сухопаров С.І. Оптимізація режимів роботи тепловозних дизель-генераторів. Інтекст. 1999. – 184 с.
9. Сайт Державного підприємства Український інститут інтелектуальної власності (УКРПАТЕНТ), назва корисної моделі: Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів, номер – u 201805581 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://base.uipv.org/search/INV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858>.

#### Slobodianiuk M.V., Nikolskyi V.V., Nikolskyi M.V. ASSESSMENT OF THE MODEL OF HYDRODYNAMIC PROCESSES OF FUEL INJECTION OF MEDIUM SPEED MARINE DIESEL

*Hydrodynamic processes in fuel injection systems of diesel engines are an actual subject of research, as they largely determine all operational parameters of diesel engines.*

*At the National University of Odesa Maritime Academy, an experimental study of the process of fuel supply of diesel fuel equipment at unsteady and partial regimes was carried out. Experiments were carried out on a motorless stand, which was equipped with a software-hardware complex for registering fuel supply and a software-hardware electromechanical complex for controlling the position of the high-pressure fuel pump rail, which made it possible to obtain experimental parameters of hydrodynamic processes in the fuel equipment of a ship's medium-speed diesel engine in dynamic mode.*

*The object of the study is hydrodynamic processes in the high-pressure fuel system when operating on the load characteristic. The subject of the study is the relationship between fuel supply parameters and regulatory and regulatory factors, as well as statistical characteristics of the obtained regression models.*

*The paper presents the results of modeling the characteristics of the ship's medium-speed diesel fuel supply system in the form of statistical dependencies of the main injection indicators on the control and operational parameters. The formed regression models reflect the interrelationship of the parameters of the injection process for the loading characteristics of the ship's medium-speed diesel engine.*

*The conducted study indicates the statistical significance of the presented models (injection angle, fuel pressure in the fuel pump fitting, pressure in the fuel channel of the nozzle depending on the frequency of rotation of the camshaft and the position of the rail of the high-pressure fuel pump) and their suitability for assessing the loading characteristics of a marine medium-speed diesel engine.*

**Key words:** *medium-speed diesel, fuel equipment, variable modes, load characteristics, hydrodynamic processes, dynamic tests, statistical models.*

**Чорна В.О.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Мельник О.Є.**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

## РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЦИВІЛЬНОЇ БУДІВЛІ

У статті розглянуто питання підвищення показників енергетичної ефективності цивільної будівлі шляхом запровадження автоматизованої системи контролю та регулювання параметрів мереж опалення, вентиляції та освітлення. З посиланням на попередні дослідження констатовано факт належності досліджуваної будівлі до низького класу енергетичної ефективності (клас D) через незадовільний стан теплової мережі та огорожувальних конструкцій, що призводить до великих теплових втрат під час кожного опалювального сезону. Запропонована автоматизована система контролю та регулювання параметрів мережі опалення, вентиляції та освітлення. Наведений детальний опис принципів роботи розробленої системи контролю та регулювання параметрів мережі опалення, вентиляції та освітлення. Запропонована система відрізняється від існуючих тим, що дозволяє вимірювати витрати теплоносія, температуру теплоносія у прямому та зворотному трубопроводах, вимірювати температуру повітря в приміщеннях будівлі, регулювати витрату теплоносія в залежності від температурного графіка роботи системи опалення та графіка роботи будівлі. Крім того, автоматизована система контролю та регулювання параметрів мережі опалення, вентиляції та освітлення дозволяє управляти лампами освітлення в приміщеннях будівлі, управляти роботою системи вентиляції. В статті наведено алгоритм функціонування підсистеми контролю електропостачання, що враховує вимоги до підтримання комфортних умов для перебування людей в приміщеннях будівлі. В основу роботи підсистеми контролю електропостачання покладений принцип зменшення витрат електроенергії. Наведена методика оцінки впливу функцій автоматизації, моніторингу та управління будівлями на енергоефективність будівлі. Представлені результати розрахунків впливу стандартної системи автоматизації, моніторингу та управління на енергоспоживання будівлею. Показано, що при застосуванні системи автоматизованого моніторингу та управління стандартного класу (клас C) в досліджуваній будівлі рівень економії теплової енергії досягає 18%, електричної енергії – 14%.

**Ключові слова:** енергетична ефективність, теплопостачання, електропостачання, освітлення, моніторинг, управління, автоматизація.

**Постановка проблеми.** Останнім часом досить актуальним у всіх країнах світу є питання економії енергії. Численними теоретичними та практичними дослідженнями доведено, що проведення комплексного обстеження цивільних будівель та впровадження енергозберігаючих заходів дозволяє економити значну частину енергоресурсів [1, с. 363]. Не остання роль у вирішенні питань енергозбереження в цивільних спорудах належить системам автоматизації інженерної інфраструктури будівель. При впровадженні таких систем показники економії можуть сягати 20%, а в окремих випадках 30%, при цьому оптимізація споживання енергії не торкається показників комфорту в приміщенні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [2] представлені результати досліджень класу енергетичної ефективності будівлі навчального закладу, які свідчать про високий рівень витрат енергії на опалення, охолодження, електрозабезпечення. В [3] наведена система керування освітленням в будівлі. В [4] описано структуру та принцип роботи системи опалення цивільної будівлі та спосіб регулювання її параметрів. В наведених джерелах відсутній комплексний підхід до вирішення питання енергоефективності інженерних систем будівлі.

**Метою статті** є розробка системи моніторингу та регулювання параметрів систем опалення та електропостачання для підвищення рівня

ефективності використання енергетичних ресурсів інженерними спорудами цивільної будівлі.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно Національного стандарту України ДСТУ – Н Б В.2.5 – 37:2008 «Інженерне обладнання будинків і споруд» автоматизована система моніторингу та управління будівель і споруд (АСМУ) являє собою систему, побудовану на основі програмно-технічних засобів, призначення якої полягає в проведенні моніторингу технологічних процесів і процесів забезпечення функціонування обладнання об'єктів (будівель і споруд). Використання АСМУ дозволяє підвищити рівень ефективності споживання енергоресурсів при експлуатації житлових, соціально-побутових та інших об'єктів будівництва [5, с. 11].

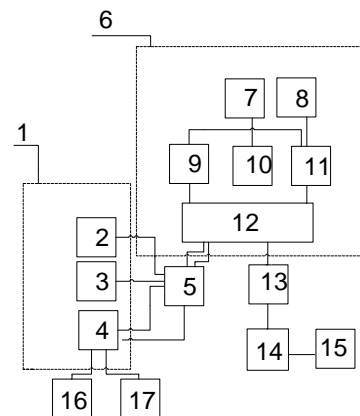
До об'єктів автоматизації належать системи теплопостачання та опалення, системи вентиляції будівель, системи водопостачання та водовідведення, системи електропостачання, електричні мережі освітлення. В представленій роботі в якості об'єкта дослідження обрано п'ятиповерхову будівлю навчального корпусу закладу вищої освіти у м. Кременчук, для якої запропоновано розробку та впровадження автоматизованої системи моніторингу на управління опаленням, вентиляцією та освітленням.

Слід зазначити, що досліджувана будівля введена в експлуатацію більш, ніж 40 років тому, має централізовані системи тепло- та електропостачання, які до цього часу не підлягали модернізації. Стан тепломереж значно погіршився, їх експлуатація супроводжується значними втратами при транспортуванні теплоносія. Крім того, за час експлуатації погіршився стан огорожувальних конструкцій, що призвело до збільшення тепловтрат. В процесі проведення досліджень по аналізу показників енергетичної ефективності будівлі, результати якого наведені в [6, с. 28], встановлено, що будівля має низький клас енергетичної ефективності (клас «D») і потребує комплексного підходу для вирішення питання енергозаощадження.

Зважаючи на необхідність підвищення рівня ефективності використання енергетичних ресурсів інженерними спорудами досліджуваної будівлі, була розроблена автоматизована система, яка дозволяє контролювати та регулювати параметри мереж опалення, вентиляції та освітлення. Блок-схема системи наведена на рисунку 1 та включає в себе наступні складові: 1 – блок сенсорів, 2 – сенсори температури і витрат теплоносія, 3 – сенсори температури зовнішнього та внутрішнього повітря, 4 – інтелектуальний датчик,

5 – блок збору даних, 6 – персональний комп'ютер, 7 – температурний графік системи опалення, 8 – режим роботи будівлі, 9 – блок ідентифікації системи опалення будівлі, 10 – блок розрахунку відносних витрат теплоносія, 11 – блок розрахунку керуючих впливів, 12 – інтерфейс зв'язку, 13 – локальний контролер керування, 14 – виконавчі механізми теплового пункту будівлі, 15 – система опалення будівлі, 16 – лампи освітлення, 17 – система вентиляції.

Принцип роботи АСМУ полягає в наступному. Дані про теплові параметри системи опалення отримують з сенсорів 2 і 3, а саме значення температури теплоносія у прямому та зворотному трубопроводах, температури теплоносія в системі опалення будівлі, температури внутрішнього та зовнішнього повітря, теплових витрат та потужності будівлі, та надходять до блоку збору даних 5. Отримані дані через інтерфейс зв'язку 12 надходять у блок ідентифікації 9, де визначаються динамічні характеристики будівлі (постійні часу охолодження та нагрівання).



**Рис. 1. Блок-схема автоматизованої системи моніторингу та регулювання параметрами мережі опалення та електропостачання**

У блоці 8 задають режим роботи будівлі, який визначається призначенням та її графіком використання. Типовими режимами роботи навчальних корпусів є робочий з 7:30 до 18:00 годин у понеділок – п'ятницю та з 9:00 до 13:00 у суботу, й неробочий – з 18:00 до 7:30 у понеділок – п'ятницю, з 13:00 годин суботи до 7:30 наступного понеділка, вихідні та святкові дні.

Розрахунок відносних теплових витрат залежно від теплового навантаження будівлі, температурного графіка системи опалення, індивідуального для певної кліматичної області, та режиму роботи будівлі здійснюється у блоці 10. Так, для забезпечення необхідної температури внутрішнього повітря у робочому режимі відповідно до



поточних вимірних значень температури зовнішнього повітря, визначається необхідне зниження витрат теплоносія та через інтерфейс зв'язку 12, локальним контролером 13 формується керуючий вплив на клапан з електроприводом для відпрацювання розрахованого значення; при цьому момент початку відпрацювання розрахованих витрат вибирається з урахуванням часу нагрівання будівлі. Для забезпечення необхідної температури внутрішнього повітря у неробочих режимах (нічний час, вихідні та святкові дні) за час охолодження будівлі до кінця робочого режиму формується керуючий вплив на закриття клапану з електроприводом; при цьому, за рахунок роботи насосу у вузлі змішування теплоносія, залишкової тепловіддачі опалювальних приладів та акумуляції теплоти огорожувальними конструкціями температура внутрішнього повітря залишається в допустимих межах.

Локальний контролер 13 забезпечує формування керуючих впливів безпосередньо на виконавчі механізми системи. В якості таких контролерів можуть бути використані електричні погодні регулятори типу Danfoss ECL, Siemens RVD з вбудованими промисловими інтерфейсами зв'язку.

Виконавчі механізми 14 теплового пункту включають: клапан з електроприводом, що встановлюють у зворотному трубопроводі до вузла змішування теплоносія; насос з електроприводом, що встановлюють у зворотному трубопроводі після вузла змішування теплоносія або замість елеваторного вузла змішування. В якості клапану з електроприводом можуть бути використані, наприклад, дво- чи триходові клапани Danfoss VRB або Siemens VVF; насоси – Vilo чи DAB з сухим або вологим ротором та східчастим регулюванням їх частоти обертання.

Стан приміщення оцінюється у блоці 5, на який поступає сигнал з персонального комп'ютера 6. Після цього на інтелектуальний датчик 4 надходить сигнал від блоку збору даних 5, який, в свою чергу, надсилає відповідь на запит про стан приміщення на персональний комп'ютер 6. Персональний комп'ютер 6, отримавши дані від блоку збору даних 5 та обробивши їх, відправляє запит (команду) до інтелектуального датчика 4, який в свою чергу залежно від отриманої команди має ввімкнути (або вимкнути) лампи освітлення 16 чи систему вентиляції 17.

В данній системі рекомендується використовувати електрорічильник однофазний електронний, наприклад NiK 2102-01.E2T, мікроконтролер якого містить годинник реального часу, стабілізовані

кварцовим резонатором, які відраховують роки, місяці, дні тижня, години, хвилини і секунди. Дані годин використовуються для виконання програми тарифів, формування періодів інтеграції середньої потужності і реєстрації подій з годинною міткою. Є функція переходу на зимовий і літній час.

В основу роботи системи контролю електропостачання цивільної будівлі покладений принцип підтримання комфортних умов роботи в приміщенні та зменшення витрат електроенергії за допомогою інтелектуального датчика, лічильника, та персонального комп'ютера. Функціонування системи відповідно до заданих вихідних параметрів здійснюється згідно алгоритму, наведеного на рисунку 2. На рисунку введені наступні позначення: Д1 – датчик, Д1=0 – датчик вимкнений, Д1=1 – датчик ввімкнений, Д1=2 – людина присутня, Д1=3 – температура більша або дорівнює 24°C, ТС=1 – сигнал від датчика руху, ТС=2 – сигнал від датчика вентиляції, ПК – персональний комп'ютер, МК – мікроконтролер, Л1 – лампа освітлення, Л1=0 – лампа освітлення вимкнена, Л1=1 – лампа освітлення ввімкнена, В1 – система вентиляції, В1=0 – система вентиляції вимкнена, В1=1 – система вентиляції ввімкнена, С1 – лічильник електричної енергії, С1=0 – лічильник вимкнений, С1=1 – лічильник ввімкнений.

Оцінка впливу функцій автоматизації, моніторингу та управління будівлями (АМУБ) на енергоефективність будівлі проводяться згідно [7, с. 26]. Існують наступні методи оцінки: метод детального розрахунку та з застосуванням коефіцієнта ефективності АМУБ. Перший метод застосовується за наявності достатньої інформації стосовно функцій автоматизації, моніторингу та управління, що використовуються для будівель та енергетичних систем. За відсутності детальної інформації про функції системи застосовують метод врахування коефіцієнта ефективності АМУБ, який дає приблизну оцінку впливу АМУБ залежно від класів ефективності системи (А, В, С, D). З урахуванням обмеженого обсягу даних для подальших розрахунків обрано останній з аведених вище методів.

Споживана інженерними системами будівлі енергія являє собою енергопотребу будівлі, загальні теплові втрати системи та додаткову енергію, що необхідна для роботи систем. Кожна з функціонуючих в будівлі систем має бути оцінена за відповідним коефіцієнтом АМУБ. Спочатку необхідно визначити один із класів ефективності АМУБ як базовий [7, с. 54]. Як правило, ним є клас С, який відповідає стандартній

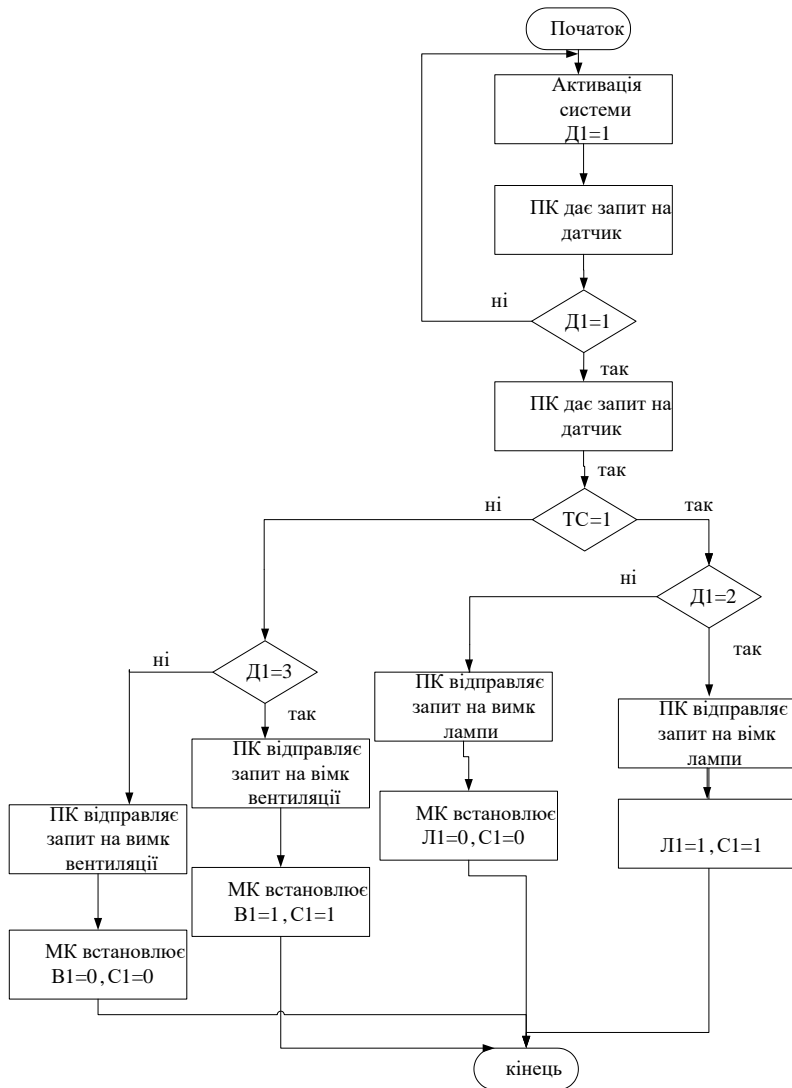


Рис. 2. Алгоритм контролю електропостачання цивільної будівлі

автоматизованій системі управління та моніторингу будівлі.

Фактори ефективності АМУБ використовуються в наступних розрахунках споживчої енергії для систем.

Система опалення:

$$Q_{H,Tot,BAC} = (Q_{H,nd,B} + Q_{H,sys}) \cdot \frac{f_{BAC,HC}}{f_{BAC,HC,ref}}; \quad (1)$$

$$W_{H,aux,BAC} = W_{H,aux} \cdot \frac{f_{BAC,el}}{f_{BAC,el,ref}}. \quad (2)$$

Система вентиляції:

$$W_{V,aux,BAC} = W_{V,aux} \cdot \frac{f_{BAC,el}}{f_{BAC,el,ref}}. \quad (3)$$

Система освітлення:

$$W_{L,BAC} = W_L \cdot \frac{f_{BAC,el}}{f_{BAC,el,ref}}. \quad (4)$$

Розрахунок енерговитрат системи опалення виконують на основі щомісячних показників, які

залежать від визначеного періоду наступним чином:

$$Q_{em,is} = \left( \frac{f_{hydr} \cdot f_{in} \cdot f_{rad}}{\eta_{em}} \right) \cdot Q_H \quad (5)$$

де  $Q_{em,is}$  – регулярні тепловтрати тепловіддавальної складової системи, кВт·год;  $Q_H$  – корисна теплова енергія, кВт·год;  $f_{hydr}$  – коефіцієнт, що враховує гідравлічне балансування системи;  $f_{in}$  – коефіцієнт, що враховує змінний тепловий режим приміщення;  $f_{rad}$  – коефіцієнт, що враховує променеву складову теплового потоку;  $\eta_{em}$  – коефіцієнт, що враховує загальний рівень ефективності тепловіддавальної складової системи у приміщенні.

Коефіцієнт загального рівня ефективності  $\eta_{em}$  розраховують згідно виразу:

$$\eta_{em} = \frac{1}{(4 - (\eta_{str} + \eta_{ctr} + \eta_{emb}))} \quad (6)$$

де  $\eta_{str}$  – коефіцієнт, що є складовою загального рівня ефективності, яка враховує вертикальний профіль температури повітря приміщення;  $\eta_{ctr}$  – коефіцієнт, що є складовою загального рівня ефективності, яка враховує регулювання температури приміщення;  $\eta_{emb}$  – коефіцієнт, що є складовою загального рівня ефективності, яка враховує питомі втрати зовнішніх огорож.

Для кожного електричного пристрою тепловіддавальної складової системи слід визначити наступні дані: електрична потужність, тривалість роботи; частину електричної енергії, перетворену в теплоту та віддану в опалюваний об'єм.

Додаткову енергію розраховують за наступною формулою:

$$W_{em,aux} = W_{ctr}, \quad (7)$$

де  $W_{em,aux}$  – додаткова енергія, кВт·год;  $W_{ctr}$  – додаткова енергія для регульовального обладнання, кВт·год.

Вираз для додаткової енергії для регульовального обладнання:

$$W_{ctr} = P_{ctr} \cdot d \cdot 24 / 1000, \quad (8)$$

де  $P_{ctr}$  – електрична номінальна споживана потужність регульовального обладнання з додатковою енергією, Вт;  $d$  – кількість днів у періоді.

Річний обсяг енергоспоживання системою освітлення  $W$  (кВт·год), розраховується згідно виразу:

$$W = W_L + W_p, \quad (9)$$

де  $W_L$  – енергія, необхідна для виконання функції штучного освітлення в будівлі, кВт·год;  $W_p$  – паразитна енергія, що необхідна для забезпечення заряду акумуляторів світильників аварійного освітлення та енергія для управління (регулювання) освітленням в будівлі, кВт·год.

Значення  $W_L$  розраховують згідно виразу:

$$W_L = (P_N \cdot F_c) \cdot ((t_D \cdot F_o \cdot F_D) + (t_N \cdot F_o)) \cdot A_f / 1000, \quad (10)$$

де  $P_N$  – питома потужність встановленого штучного освітлення в будівлі, Вт/м<sup>2</sup>;  $F_c$  – постійний коефіцієнт яскравості, що відноситься до використання навантаження встановленого освітлення при функціонуєчому контролі сталої освітленості зони;  $F_o$  – коефіцієнт використання освітлення, є відношенням використання загальної встановленої потужності штучного освітлення до наявного природного освітлення зони;  $F_D$  – коефіцієнт природного освітлення, є відношенням використання загальної встановленої потужності штучного освітлення до наявного природного освітлення зони;  $t_D$  – час використання природного освітлення протягом року, год;  $t_N$  – час використання штучного освітлення протягом року, год;  $A_f$  – кондиціонована площа будівлі, м<sup>2</sup>.

Для визначення  $W_p$  використовується вираз:

$$W_p = (P_{em} + P_{pc}) A_f, \quad (11)$$

де  $P_{em}$  – загальна встановлена питома потужність заряду акумуляторів світильників аварійного освітлення, кВт·год/м<sup>2</sup>;  $P_{pc}$  – загальна встановлена питома потужність усіх систем управління приладами освітлення зони в час, коли лампи не використовують, кВт·год/м<sup>2</sup>;  $A_f$  – кондиціонована площа будівлі, м<sup>2</sup>.

Провівши розрахунки щодо оцінки впливу функцій АМУБ на енергоефективність будівлі з використанням вищенаведеної методики, було встановлено, що в результаті впровадження автоматизованої системи моніторингу та управління інженерними системами будівлі, яка (система) належить до класу енергоефективності С (стандартна система) можна досягти економії теплової енергії до 18%, електричної енергії на рівні 14%. Для визначення величини економії енергії в першу чергу було розраховано обсяги енергоспоживання системами опалення та освітлення згідно технічних параметрів систем та з урахуванням режимів їх роботи протягом року. Для системи опалення ця величина становить 280,8 тис.кВт·год, для системи освітлення – 139,78 тис.кВт·год.

Якщо автоматизована система відноситься до класу енергоефективності В, тобто вище за клас С,

то вона повинна виконуватися функція автоматизації будівлі, а також деякі спеціальні функції, контролери приміщень повинні взаємодіяти з системою автоматизації будівлі.

При застосуванні системи класу А в ній повинні бути реалізовані функції класу В, функція технічного управління будівлею, а також деякі спеціальні функції. Відмінною рисою таких систем є врахування багатьох факторів. Наприклад, ступінь регулювання залежить від рівня заповнення приміщення, якості повітря, рівня освітленості, температури повітря в приміщенні тощо. Крім того, систем класу А включають додаткові інтегровані функції упорядкування взаємозв'язків між опаленням, вентиляцією, кондиціонуванням повітря та іншими функціями обслуговування (наприклад, електропостачання, освітлення, затемнення від сонця тощо).

Системи класу А є найбільш енергоефективними та дозволяють отримати найбільшу економію енергетичних ресурсів. Але їх вартість є основною з причин обмеженого використання в цивільних спорудах.

Співставляючи рівень бажаного ефекту від впровадження автоматизованих систем моніторингу та управління інженерними системами будівлі та рівень фінансових витрат, для досліджуваної будівлі пріоритетним варіантом системи була обрана система з класом енергетичної ефективності С з перспективою вдосконалення (модернізації) до класу В.

**Висновки.** В результаті аналізу існуючих систем та способів досягнення високих показників енергетичної ефективності будівель були виявлені недоліки існуючих технічних рішень та з урахуванням цього запропонована автоматизована система моніторингу та регулювання параметрами мережі опалення, вентиляції та освітлення. Наведений принцип роботи запропонованої системи та окремо описаний алгоритм функціонування підсистеми контролю електропостачання, що враховують вимоги до підтримання комфортних умов перебування людей в приміщеннях. Виконана оцінка впливу функцій АМУБ на енергоефективність будівлі. Показано, що при застосуванні системи автоматизованого моніторингу та управління стандартного класу в досліджуваній будівлі рівень економії теплової енергії досягає 18%, електричної енергії – 14%. При застосування системи класу А рівень економії може бути вищим, але й витрати на її встановлення, обслуговування та забезпечення ефективної роботи значно вищі.

**Список літератури:**

1. Чорна В.О., Савенко О.С. Про актуальність та доцільність впровадження енергозберігаючих заходів у житлових. *Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку*: матеріали XXV Міжнар. наук.-практ. конф., м. Рига, 07 жовтня 2022. / ГО «ВАДН», 2022. С. 363–366.

2. Chorna V., Matveeva A. The education casing building survey for the energy efficiency class definition. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, м. Кременчук, 12–13 квіт. 2018 р. / Кременчуц. нац. ун-т ім. М. Остроградського, 2018. С. 117–118.

3. Система керування освітленням: патент 5827 Україна : H05B 39/04. № u 20040907307 ; заявл. 06.09.2004 ; опубл. 15.03.2005, Бюл. № 3. 4 с.

4. Спосіб регулювання параметрів системи опалення цивільної будівлі : патент 85322 Україна : F24D 3/00. № u 201308137; заявл. 27.06.2013 ; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. 4 с.

5. ДСТУ-Н Б В.2.5-37:2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Настанова з проектування, монтажування та експлуатації автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями і спорудами. Чинний від 01.10.2008. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 14 с.

6. Науково-дослідна робота «Оптимізація енергоспоживання навчального закладу за рахунок проведення робіт з енергетичного обстеження». № НДР 0117U000075, 2017. 38 с.

7. ДСТУ Б EN 15232 (EN 15232:2007, IDT) Енергоефективність будівель вплив автоматизації, моніторингу та управління будівлями. чинний від 01.04.2012. Київ: Мінрегіон України, 2012 р. 109 с.

**Chorna V.O., Melnik O.Ye. DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR ADJUSTING THE PARAMETERS OF BODY SUPPLY AND ELECTRICAL SUPPLY OF A CIVIL BUILDING**

*The article deals with the issue of increasing the energy efficiency indicators of a civil building by introducing an automated system of control and regulation of parameters of heating, ventilation and lighting networks. With reference to previous studies, it was established that the investigated building belongs to a low class of energy efficiency (class D) due to the unsatisfactory state of the heat network and enclosing structures, which leads to large heat losses during each heating season. An automated system of control and regulation of heating, ventilation and lighting network parameters is proposed. A detailed description of the operating principles of the developed system of control and regulation of heating, ventilation and lighting network parameters is given. The proposed system differs from the existing ones in that it allows you to measure the coolant consumption, the temperature of the coolant in the direct and return pipelines, measure the air temperature in the premises of the building, and regulate the coolant flow depending on the temperature schedule of the heating system and the schedule of the building. In addition, the automated system of control and regulation of parameters of the heating, ventilation and lighting networks allows you to control lighting lamps in the premises of the building, control the operation of the ventilation system. The article provides an algorithm for the operation of the power supply control subsystem, which takes into account the requirements for maintaining comfortable conditions for the stay of people in the premises of the building. The basis of the electricity supply control subsystem is the principle of reducing electricity consumption. The methodology for assessing the impact of automation, monitoring and building management functions on the building's energy efficiency is given. The results of the calculations of the impact of the standard automation, monitoring and management system on the energy consumption of the building are presented. It is shown that when using the automated monitoring and control system of the standard class (class C) in the investigated building, the level of thermal energy saving reaches 18%, electrical energy – 14%.*

**Key words:** energy efficiency, heat supply, power supply, lighting, monitoring, management, automation.

# ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.765:542.61:546.571

DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/12

**Обушенко Т.І.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФЛОТОЕКСТРАКЦІЙНОГО ВИДАЛЕННЯ ІОНІВ ЦИНКУ З РОЗЧИНІВ

У статті досліджено флотоекстракцію іонів цинку з низькоконцентрованих розчинів. Флотоекстракція – метод, який поєднює переваги іонної флоатації та рідинної екстракції. Суть методу полягає в проходженні бульбашок газу через водну фазу і транспортуванні гідрофобного комплексу (сублат), утвореного барвником і поверхнево-активною речовиною (ПАР) в органічну фазу. Досліджували модельні низькоконцентровані водні розчини іонів цинку концентрації 10 мг/дм<sup>3</sup> з використанням натрієвих солей каприлової та лауринової кислот в якості збирачів та ізоамілового спирту (екстрагент). Отримано параметри процесу, які забезпечують ефективний перебіг процесу. А саме рН 3, молярне співвідношення  $Zn^{2+}$ :ПАР = 1:2, витрата повітря 50 см<sup>3</sup>/хв, об'єм екстрагенту – 5 см<sup>3</sup>, тривалість процесу – 20 хв. Ступінь видалення іонів цинку з початковою концентрацією 10 мг/дм<sup>3</sup> за вказаних умов становить близько 66–68%. Запропонований спосіб флотоекстракційного очищення є привабливою альтернативою існуючим методам очищення стічних вод з метою повернення їх в оборотне водопостачання. Бо він має низку переваг: багатократного концентрування іонів забрудника у шарі органічного розчинника з можливістю його регенерації, значно менша кількість органічного розчинника, незалежність ефективності процесу від константи розподілу (на відміну від методу екстракції), відсутність піни (у порівнянні з методом флоатації), відсутність великої кількості вологого осаду (у порівнянні з реагентним методом). Він також може бути застосований в системах локального очищення стоків з наступним поверненням води у технологічний процес. Це забезпечить зниження витрат на споживання водних ресурсів, скидання стічних вод у водні об'єкти, а також обмежить потрапляння шкідливих речовин у навколишнє середовище. Крім того, особливості флотоекстракції дозволяють регенерувати екстрагент та ПАР.

**Ключові слова:** видалення іонів цинку, флотоекстракційне очищення стічних вод, сублат, екстрагент.

**Постановка проблеми.** Проблема очищення виробничих стічних вод від сполук важких металів є однією з найбільш важливих і складних. Незважаючи на величезну кількість вітчизняних та зарубіжних розробок, цю проблему не можна вважати вирішеною. Відомо, що попадання важких металів зі стічними водами у водоймища призводить до накопичення даних сполук в організмі гідробіонтів, рослинної маси, що в подальшому може призводити до загибелі водних організмів, пригнічення рослинності, зниження біорізноманіття водойм, міграції іонів металів по харчових ланцюгах. Шкода, заподіяна населенню та народному господарству стічними водами, що містять важкі метали, робить знешкодження цих вод важливим завданням. Одним із значних джерел утворення стічних вод, що містять іони важ-

ких металів, є гальванічні цехи металообробних, приладобудівних, машинобудівних підприємств. Найчастіше на таких підприємствах здійснюється нанесення цинкових, хромових, нікелевих та мідних покриттів. Внаслідок цього стічні води даних виробництв містять значну кількість сполук важких металів у своєму складі. Технології очищення стічних вод від іонів важких металів дуже недосконалі і не забезпечують необхідний ступінь очищення. Тому завдання пошуку нових, альтернативних методів очищення стічних вод від іонів важких металів залишається важливим та актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенням проблеми видалення іонів важких металів може бути флотоекстракція – метод який володіє перевагами серед відомих флоатаційних

методів [1–2]. Особливістю процесу є видалення малорозчинної речовини (сублату) в шарі органічної рідини – екстрагенту – на поверхні водної фази [3–5]. Сублат або розчиняється в органічній фазі або утворює суспензію, яка утримується в екстрагенті завдяки змочуванню [6–7]. Кількість сублату зконцентрованого в органічному шарі не залежить від його об'єму, на відміну від рідинної екстракції. Рівновага встановлюється не у всій системі, а лише на межі розподілу води та екстрагенту. Проходження сублату в органічний шар зумовлено рухом потоку бульбашок газу. Не зважаючи на всі переваги флотоекстракції, цей метод очищення досі не набув широкого промислового застосування. Але багаточисельні результати експериментальних досліджень даного процесу [8–9] свідчать про доцільність поширення флотоекстракції, в тому числі і для видалення іонів важких металів зі стічних вод.

Флотоекстракційне очищення реалізують наступним чином. До забрудненої води додають збирач – поверхнево-активну речовину (ПАР) для утворення сублату – малорозчинної гідрофобної сполуки [10–11]. Сублат з водної фази транспортується бульбашками газу в шар органічного екстрагенту, який більш легкий за воду і знаходиться на поверхні водного шару. Швидкість руху бульбашок повинна бути значно меншою, ніж при іоній флотації. Це необхідна умова для уникнення розривів органічного шару. На початку флотоекстракція застосовувалась тільки для вилучення іонів різних металів з водного середовища. Поступове впровадження цієї технології дало змогу розширити межі її використання: даний спосіб було обрано для видалення різноманітних розчинених органічних сполук та флотаційного очищення гідрофобних рідин. На сучасному етапі розвитку водоочисних технологій флотоекстракції застосовують в біоінженерії та біосепарації, для аналітичного контролю водних об'єктів, при очищенні стічних вод, забруднених поллютантами органічного та неорганічного характеру [12–13]. Але безперечні переваги методу роблять його привабливим для очищення стічних вод.

Об'єктом нашого дослідження є флотоекстракція в системах цинк-каприлат натрію ( $C_7H_{15}COONa$ ) та цинк-лаурат натрію ( $C_{11}H_{23}COONa$ ). А метою даної роботи є визначення параметрів флотоекстракції (природа екстрагенту, рН середовища, тривалість флотоекстракції, значення молярного співвідношення ПАР:Метал, витрата газу, розмір пухирців та інші) для найбільш повного видалення поллютанту

з низькоконцентрованих розчинів. Таки розчини досить поширені але їх очищення має певні труднощі і є невирішеною частиною проблеми видалення іонів важких металів. Застосування флотоекстракції дасть змогу отримати додаткову кількість води для технологічних цілей, адже гальванічне виробництво є водоемним і використовує воду питної якості. Крім цього існує можливість повертати цинк у виробництво, або використовувати отримані сублати лаурату і каприлату цинку у будівництві, лако-фарбової промисловості, виробництві пластмас та інших. Що дозволить значно покращити економічні показники підприємств.

**Постановка завдання.** Метою статті є визначення параметрів ефективного флотоекстракційного видалення іонів цинку з низькоконцентрованих водних розчинів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для дослідження флотоекстракції використовували установку, яка була описана в попередніх роботах [14]. Повітря подавали компресором у нижню частину флотоекстракційної колонки, витрату контролювали ротаметром. Диспергатором повітря слугував фільтр Шотта. Концентрація іонів цинку в модельних розчинах в більшості експериментів становила  $10 \text{ мг/дм}^3$ . Об'єм розчину –  $200 \text{ см}^3$ , об'єм екстрагенту –  $5 \text{ см}^3$ . Процес флотоекстракції проводили до встановлення постійної залишкової концентрації іонів цинку, яку визначали фотометричним методом з ксилеоловим оранжевим на однопроменевому скануючому спектрофотометрі Portlab 501 [15]. Корегування рН проводили розчинами  $NaOH$  та  $HCl$  з концентрацією  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  (рН водних розчинів вимірювали за допомогою рН-метра Portlab 102. Ефективність процесу флотоекстракції оцінювали за ступенем видалення іонів цинку.

Було експериментально здійснено вибір органічного екстрагенту. При виборі органічної фази слід звернути увагу на певні властивості, якими має володіти екстрагент:

- здатність утримуватися на поверхні води;
- не змішуватися з водою;
- не утворювати емульсії;
- нелеткість за кімнатної температури.

Для дослідження вилучення іонів цинку розглянуто низку органічних екстрагентів (див. рис. 1). В якості збирача використовували каприлат натрію ( $C_7H_{15}COONa$ ) з концентрацією  $0,05 \text{ моль/дм}^3$ . Вихідна концентрація цинку  $10 \text{ мг/дм}^3$ , об'єм розчину –  $200 \text{ см}^3$ , рН 3, об'єм органічного екстрагенту –  $5 \text{ см}^3$ , тривалість процесу – 20 хвилин. Отримано найвищий ступінь вилучення при вико-

ристанні ізоамілового спирту. Тому всі наступні дослідження проводили саме з цим екстрагентом.

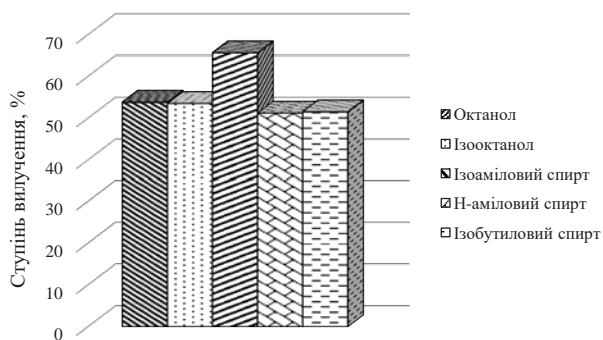


Рис. 1. Залежність ступеня вилучення іонів цинку від органічного екстрагенту

На рис. 2 зображено залежність ступеня вилучення іонів цинку від молярного співвідношення  $Zn^{2+}$ :ПАР. Згідно результатів, в діапазоні молярних співвідношень  $Zn^{2+}$ : ПАР від 1:0,5 до 1:1,5, ступінь вилучення цинку не досягає максимуму, і, наприклад, в системі  $Zn^{2+}$ -  $C_7H_{15}COONa$  зростає відповідно від 28,4% до 49,5%. Це можна пояснити нестачею ПАР для повного зв'язування цинку в сублат. Максимальна кількість утворення сублату та насичення молекулами ПАР межі розділу фаз вода – органічний шар, а також максимальний ступінь вилучення цинку спостерігається в системі  $Zn^{2+}$ - $C_{11}H_{23}COONa$  – 67,6%. Подальше зростання кількості ПАР в розчині ( $Zn^{2+}$  : ПАР = 1:2,5 і т.д.) призводить до того, що у водній фазі з'являється надлишкова кількість аніонів ПАР, що може призводити до солубілізації сублату.

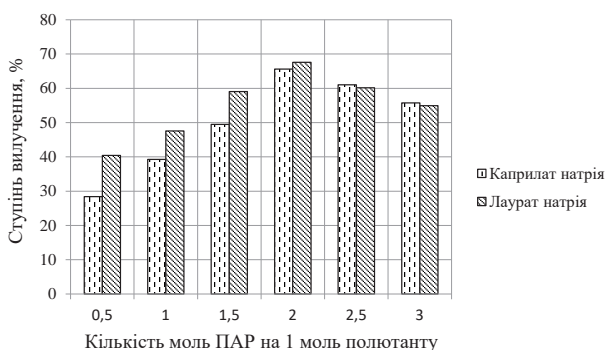


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення іонів цинку від молярного співвідношення ПАР:  $Zn^{2+}$

З метою визначення впливу рН середовища на склад сублату, утвореного при взаємодії ПАР з іоном  $Zn^{2+}$  досліджено залежність ступеню вилучення цинку від рН розчину. Водневий показник корегували в діапазоні 2–8, нижче за рН утво-

рення гідроксиду цинку. З рис. 3 видно, що ступінь вилучення цинку в інтервалі рН 2–4 досягає значень 60–67,5% вилучення, більш за все це пов'язано з тим, що при низькому значенні рН ПАР починають утворювати з іоном  $Zn^{2+}$  сублат складу  $Me(RCOO)_2$ .

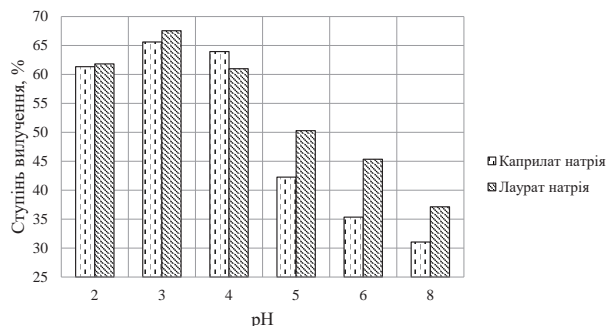


Рис. 3. Залежність ступеня вилучення іонів цинку від рН

На рис. 4 надано залежність ступеня вилучення  $Zn^{2+}$  від об'єму органічної фази. Встановлено, що при висоті органічного шару менше 5 мм відбувається значне погіршення процесу флото-екстракції внаслідок руйнування суцільності та стабільності шару розчинника наприкінці процесу. Розрив шару призводить до зменшення поверхні контакту водної фази з органічною, а також до зворотного переходу у водний розчин із краплями води сублату, сфлотованого, але не затриманого в розчиннику. Відзначено, що коли об'єм органічної фази занадто малий, межа розподілу фаз буде розриватися при навіть незначній витраті повітря і, отже, процес флотоекстракції втрачає свою ефективність. Таким чином, важливим для процесу флотоекстракції є не об'єм органічної фази, а збереження її суцільності, на що впливають такі параметри як швидкість газу, розмір бульбашок, висота шару розчинника, діаметр колонки.

При збільшенні об'єму органічної фази більше  $5\text{ см}^3$  ( $d_{\text{колонки}} = 3,5\text{ см}$ ) ефективність утримання сублату підвищується, одночасно зростає і ступінь вилучення металу. Це пов'язано з більш повним переходом утвореного сублату цинку до екстрагенту. Проте, подальше збільшення об'єму органічної фази не призводить до зміни ступеню видалення.

Зміна співвідношення об'єму органічного розчинника до об'єму водної фази не впливає на ефективність процесу, оскільки зміна значень ступеню вилучення іонів цинку з розчину є незначною і вкладається у межі допустимої похибки експерименту.

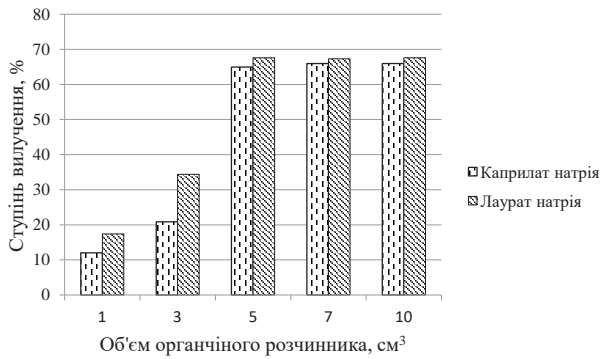


Рис. 4. Залежність ступеня вилучення цинку від об'єму органічної фази

Тривалість процесу флотоекстракції варіювалась від 5 до 40 хвилин з використанням збирачів лаурату натрію з концентрацією 0,025 моль/дм³ та каприлату натрію з концентрацією 0,05 моль/дм³ (рис. 5). При проведенні процесу протягом 5–15 хвилин сублат не встигав у повній мірі перейти з водної фази в органічну, тому максимальний ступінь вилучення не досягається. Максимальний перехід сублата в органічну фазу спостерігався при флотоекстракції впродовж наступних 20–40 хвилин ступінь вилучення цинку зростав в двох системах: в системі  $Zn^{2+} - C_7H_{15}COONa$  становив  $67,29 \div 67,57\%$ , а в системі  $Zn^{2+} - C_{11}H_{23}COONa - 67,57 \div 68,66\%$ .

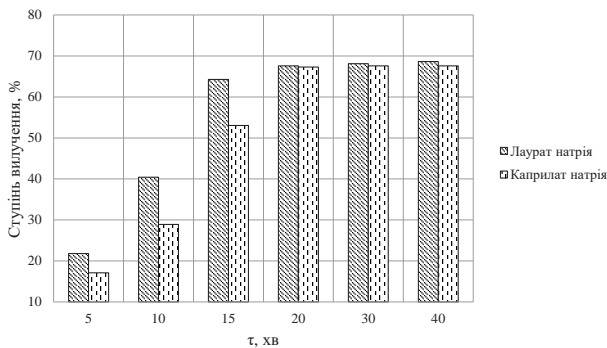


Рис. 5. Залежність ступеня вилучення цинку від тривалості процесу

Розмір бульбашок є важливим параметром процесу флотоекстракції. Зі зменшенням розмірів бульбашок, час перебування бульбашок в колонці з розчином збільшується, тому що збільшується площа поверхні бульбашок. І це призводить до збільшення константи швидкості процесу.

Для генерації бульбашок використовували фільтри Шотта пористістю 40 (розмір бульбашок 16–40 мкм), 100 (розмір бульбашок 40–100 мкм), та ПОР 160 (розмір бульбашок 100–160 мкм). Найвищий ступінь видалення цинку було досягнуто з використанням фільтру ПОР 100, який для

системи  $Zn^{2+} - C_7H_{15}COONa$  становить 65,6%, а в системі  $Zn^{2+} - C_{11}H_{23}COONa - 67,6\%$  (рис. 6).

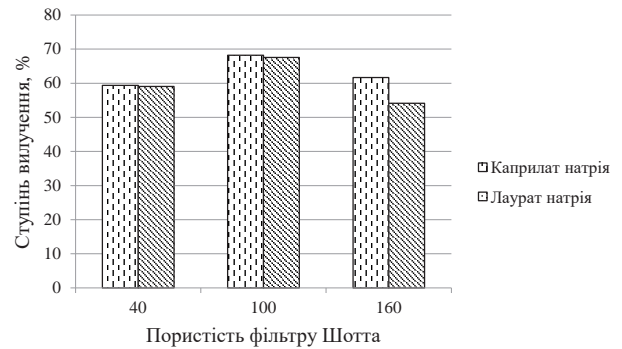


Рис. 6. Залежність ступеня вилучення цинку від розміру бульбашок

Фільтр Шотта ПОР 40 показав гірший результат порівняно з ПОР 100, що пов'язано з тим, що витрати повітря 50 см³/хв недостатньо для утворення достатньої кількості бульбашок через високу щільність фільтру.

При збільшенні розміру бульбашок до 100–160 мкм ступінь вилучення металу спадає, оскільки за рахунок тиску в бульбашках вони піддаються злиттю, чим більший радіус у бульбашки, тим меншою стає загальна площа поверхні адсорбції політанту, тому і ступінь видалення іонів цинку зменшується.

Дослідження залежності ступеня вилучення  $Zn^{2+}$  від вихідної концентрації металу проводили при наступних параметрах системи: вихідна концентрація цинку 5, 10, 15, 20 та 30 мг/дм³, співвідношення  $Zn^{2+}:ПАР=1:2$ , рН 3, тривалість процесу 20 хв, об'єм органічної фази 5 см³ (рис. 7).

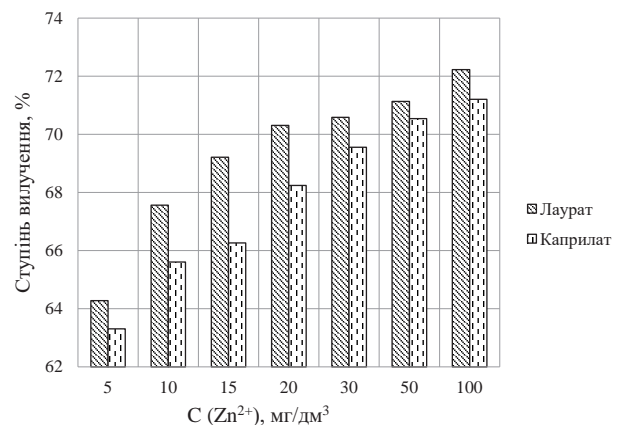


Рис. 7. Залежність ступеня вилучення цинку від вихідної концентрації металу

При внесенні каприлату або лаурату натрію в низькоконцентрований розчин ( $C_{Zn^{2+}} = 10$  мг/дм³), що містить іони цинку, візуально спостерігається



незначне помутніння розчину, яке зростає при збільшенні вихідної концентрації поллютанту. Це пояснюється тим, що збільшення концентрації досліджуваних металів у розчині призводить до збільшення кількості часточок сублату. Враховуючи стабільність швидкості подачі газу і рівномірність розподілу бульбашок по всьому об'єму колонки, можна стверджувати, що імовірність захоплення бульбашками часточок сублату при зростанні концентрації металів буде зростати, і відповідно буде зростати ступінь вилучення.

Для ефективного вилучення сублату  $Zn^{2+}$  в органічну фазу необхідно забезпечити швидкість подачі газу, яка забезпечує перехід сублату в органічну фазу без її руйнування. Це можливо в умовах ламінарного режиму, тобто у відсутності зайвого турбулентного потоку, що може призводити до порушення суцільності органічного шару (рис. 8).

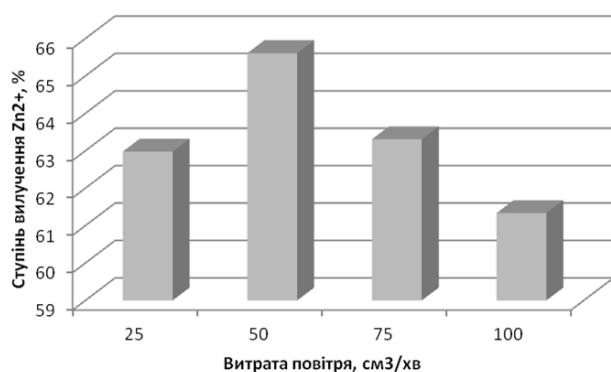


Рис. 8. Залежність ступеня вилучення  $Zn^{2+}$  від витрати повітря

При швидкості подачі газу 25 см<sup>3</sup>/хв ламінарний режим зберігається, але утворений сублат переходить в органічну фазу вкрай повільно і повний перехід в органічну фазу не відбувається.

Коли швидкість подачі газу досягає 50 см<sup>3</sup>/хв, відбувається повний перехід сублату в органічний розчинник в умовах ламінарного режиму.

При зростанні швидкості подачі газу понад 50 см<sup>3</sup>/хв і вище, режим потоку стає турбулентним, спостерігається розрив органічного шару і частина утвореного сублату повертається у водну фазу.

**Висновки.** Досліджено вилучення іонів цинку з модельних низькоконцентрованих водних розчинів (5–30 мг/дм<sup>3</sup>) методом флотоекстракції. Як збирачі використовували натрієві солі каприлової та лауринової кислот. На основі експериментальних досліджень отримано значення параметрів, які забезпечують ефективність процесу: об'єм екстрагенту (ізоаміловий спирт) – 5 см<sup>3</sup>, співвідношення іонів цинку до поверхнево-активної речовини – 1:2, рН 3, витрата повітря – 50 см<sup>3</sup>/хв, тривалість процесу – 20 хв. Ступінь видалення іонів цинку з початковою концентрацією 10 мг/дм<sup>3</sup> за таких умов становить близько 66–68%. Запропонований спосіб флотоекстракційного очищення є привабливою альтернативою існуючим методам очищення стічних вод з метою повернення їх в оборотне водопостачання. Бо він має низку переваг: багатократного концентрування іонів забрудника у шарі органічного розчинника з можливістю його регенерації, значно менша кількість органічного розчинника, незалежність ефективності процесу від константи розподілу (на відміну від методу екстракції), відсутність піни (у порівнянні з методом флотації), відсутність великої кількості вологого осаду (у порівнянні з реагентним методом). Запропонований метод доцільно використовувати в системах локального очищення стічних вод з подальшим поверненням води у технологічний процес. Впровадження методу забезпечить зниження витрат на споживання води, скидання забруднених стоків у водні об'єкти, що обмежить потрапляння поллютантів у навколишнє середовище. Флотоекстракція дозволяє регенерувати як екстрагент так і ПАР.

Також метод дозволяє повертати цинк у виробництво, або використовувати отримані сублати лаурату і каприлату цинку у будівництві, лакофарбової промисловості, виробництві пластмас та інших. Це може покращити економічні показники підприємств. Перспективами подальших досліджень повинно стати визначення параметрів флотоекстракції на реальних стічних водах промислових підприємств та масштабування процесу очищення.

#### Список літератури:

1. Lu Y., Zhu X. Solvent Sublation: Theory and Application // Separation and Purification Methods. 2001. 30 (2). P. 157–189. doi: <https://doi.org/10.1081/spm-100108158>
2. Bi P., Dong H., Dong J. The recent progress of solvent sublation // Journal of Chromatography A, 2010. 1217 (16). P. 2716–2725. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.11.020>
3. Walkowiak W. Ion flotation and solvent sublation of cobalt cyanide complexes // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2007. 30 (1). P. 611–619. doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.503300180>
4. Lu Y. J., Liu J. H., Xiong, Y., Zhu, X. H. Study of a mathematical model of metal ion complexes in solvent sublation // Journal of Colloid and Interface Science. 2003. 263 (1). P. 261–269. doi: [https://doi.org/10.1016/s0021-9797\(03\)00192-9](https://doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00192-9)

5. Kim Y., Shin J., Lee W., Lee Y. Solvent sublation trace noble metals by formation of metal complexes with 2-mercaptobenzothiazole // Bulletin of the Korean Chemical Society. 2001. 22, P. 19–24.
6. Kim Y., Shin J., Choi Y., Lee W. Studies on solvent sublation of trace heavy metals by continuous flow system as ternary complexes of 1,10-phenanthroline and thiocyanate ion // Bulletin of the Korean Chemical Society. 2003. 24. P. 1775–1780.
7. Kim Y., Choi Y., Lee W., Lee Y. Determination of zinc and lead in water samples by solvent sublation using ion pairing of metal-naphthoate complexes and tetra-n-butylammonium ion // Bulletin of the Korean Chemical Society. 2001. 22. P. 821–826.
8. Obushenko T., Tolstopalova N., Chyrieva M. Removal of chromium (VI) ions from aqueous solutions // Technology Audit and Production Reserves. 2021. 5(3(61)). P. 17–20. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.242811>
9. Obushenko T., Tolstopalova N., Baranuk N. Investigation of solvent sublation of cobalt ions from water solutions // Technology Audit and Production Reserves. 2019. 2(3(46)). P. 25–27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.168744>
10. Fatemeh B., Jalal S., Abolfazl N. Treatment of oilfield produced water by dissolved air precipitation/solvent sublation // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2012. 80. P. 26–31.
11. Mukhopadhyay G., Sarkar A., Samanta M., Pal T., Chakraborty B., Dutta C., Roy A., Halder P., Dutta S. Treatment of Waste Whey by Solvent Sublation Method // Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development. 2021. 9(5). P. 55–61. DOI: <http://dx.doi.org/10.22270/ajprd.v9i51024>
12. Bi P.Y., Dong H.R., Guo Q.Z. Separation and purification of penicillin G from fermentation broth by solvent sublation // Separation and Purification Technology. 2009. 6. P. 228–231.
13. Wu Z., Liang B., Hu B., Zheng H. Separation of l-lysine by solvent sublation // Separation and Purification Technology. 2009. 66. P. 228–231.
14. Obushenko T., Tolstopalova N., Bolielyi O. The removal of heavy metal (Nickel) ions from waste waters // Water&Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. 2017. 1(21) P. 24–30. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20308>
15. Набиванець Б. Й. Аналітична хімія природного середовища: Підручник. / Б. Й. Набиванець, В. В. Сухан, Л. В. Калабіна.– К.: Либідь, 1996. – 304 с.

#### **Obushenko T.I. STUDY OF THE PARAMETERS OF ZINC IONS REMOVAL WITH SOLVENT SUBLATION PROCESS**

*The solvent sublation removal of zinc ions from low-concentration solutions is examined. Solvent sublation is a method that combines the advantages of ion flotation and liquid extraction. There are a few studies of solvent sublation process applied for wastewater treatment from heavy metal ions, which are among the most dangerous pollutants. Model low-concentration aqueous solutions of zinc ions with a concentration of 10 mg/dm<sup>3</sup> were studied using sodium salts of caprylic and lauric acids as collectors and isoamyl alcohol as extractant. The parameters of the process are obtained, which ensure the efficient flow of the process. Namely, pH 3, molar ratio Zn<sup>2+</sup>:surfactant = 1:2, air consumption 50 cm<sup>3</sup>/min, extractant volume – 5 cm<sup>3</sup>, duration of the process – 20 min. The zinc ions removal degree with an initial concentration of 10 mg/dm<sup>3</sup> under the specified conditions is about 66-68%. The proposed method of solvent sublation treatment is a driving attention alternative to existing methods of wastewater treatment with the aim of returning it to the water supply system. The method has a few advantages: multiple concentration of pollutant ions in the organic solvent layer with the options of its regeneration, a much smaller amount of organic solvent, ability of the process efficiency from the distribution constant (in contrast to the extraction method), no foam (compared to the flotation method), not a large amount of wet sediment (compared to the reagent method). It can also be used in local wastewater treatment systems with the subsequent return of water to the technological process. This will ensure a reduction in the costs of water resources consumption, wastewater discharge into water bodies, and will also limit the ingress of harmful substances into the environment. In addition, the features of float extraction allow the extraction agent and surfactant to be regenerated.*

**Key words:** zinc ions removal, solvent sublation of wastewater treatment, sublimate, extractant.

**Пилипенко І.В.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ГРАНУЛЬОВАНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ЛАПОНІТУ ТА АЛЬГІНАТУ НАТРІЮ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ МЕТИЛЕНОВОГО БЛАКИТНОГО З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

У статті представлено дослідження реологічних характеристик суспензій лапоніту з додаванням альгінату натрію. Встановлено, що усі досліджувані склади є неньютонівськими псевдопластичними рідинами, які «розріджуються» при зсуві. Встановлено, що наявність граничного напруження зсуву спостерігається лише для суспензії чистого лапоніту та зразка 20% альгінату. Показано, що наявність альгінату натрію впливає на формування структур в системі та змінює реологічну поведінку. Застосування реологічних моделей Кроса, Гершеля-Баклі, Бінгама-Шведова та степеневому закону дало змогу описати експериментальні дані та розрахувати коефіцієнти зазначених моделей. Залежності пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву від складу системи дозволяють визначити оптимальний вміст компонентів для виготовлення якісних гранул композиту зі зменшеним відсотком браку. Досліджено процес адсорбції метиленового блакитного за допомогою синтезованих гранульованих композитів. Встановлено, що адсорбційна рівновага встановлюється після 250–300 хвилин контакту твердої та рідкої фаз. Кінетична крива описана двома моделями: псевдопершого та псевдодругого порядку. Моделі показують високу кореляцію з експериментальними даними, що дозволяє їх використовувати для опису кінетики процесів сорбції метиленового блакитного. Встановлено, що іони метиленового блакитного адсорбуються на іонообмінних позиціях частинок лапоніту та карбоксильних групах альгінату, а гідроксильні групи  $=\text{Fe}-\text{OH}$  також можуть бути активними центрами адсорбції. Значення коефіцієнтів кореляції свідчать про можливість використання моделей Ленгмюра та Фрейндліха, при чому модель Ленгмюра краще описує експериментальні дані. Зниження величини сорбції та спорідненості спостерігається при зміні співвідношення  $\text{Zr}:\text{Fe}$  у розчинах зміцнення. Розрахунки показують, що зразок  $\text{Fe}100$  має найвищу величину граничної адсорбції та константу рівноваги, що свідчить про його найвищу ефективність у вилученні барвника. Синтезовані гранульовані композити можуть бути використані як ефективні сорбційні матеріали для очищення води від катіонних барвників, зокрема метиленового блакитного.

**Ключові слова:** лапоніт, гранульований нанокомпозит, сорбційне вилучення, гранули альгінату, барвники, метиленовий блакитний.

**Постановка проблеми.** Забруднення водних ресурсів важкими металами та органічними сполуками становить серйозну загрозу для екологічної стійкості та здоров'я населення. Метиленовий блакитний є катіонним барвником, який широко застосовується в текстильній, фармацевтичній та інших галузях промисловості. Його присутність у водних системах може спричинити токсичний вплив на живі організми та негативно впливати на довкілля. Одним з ефективних методів видалення метиленового блакитного з водних розчинів є використання різного роду сорбентів. Серед вже відомих та широко застосовуваних адсорбентів, таких як активоване вугілля, іонообмінні смоли, неорганічні іонообмінні матеріали (фосфати цирконію та титану) [1, с. 78] привертають увагу матеріали на основі природних та синтетичних

глинистих мінералів. Такі мінерали широко використовуються в різних галузях промисловості, мають достатньо високі площу питомої поверхні та катіонообмінну ємність. Однак висока дисперсність не дозволяє ефективно використовувати їх в динамічних умовах сорбційного очищення забруднених вод.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Для вирішення такої задачі запропоновано ряд методів модифікування глинистих мінералів. Серед таких методів варто відмітити інтеркаляцію поліядерними комплексами перехідних металів [2, с. 58], кислотну активацію, термічну обробку [3, с. 2], а також застосування водорозчинних полімерів для виготовлення композиційних сорбентів [4, с. 17]. Використання водорозчинних полімерів різного складу дозволяє одержувати гранульовані

композиційні матеріали, які зручно використовувати в сучасних технологіях водоочищення.

Відомі роботи, що висвітлюють особливості синтезу та сорбційні властивості гранульованих композитів на основі глинистих мінералів або гідроксидів/оксидів та альгілату іонотропно зміцненого іонами кальцію, заліза [5, с. 3], цирконію, церію, лантану [6, с. 4] та інших [6, с. 3].

Однак, літературних даних щодо гранульованих композитів на основі іонотропно зміцнених одразу двома різними іонами не представлено. Тому актуальним завданням є синтез та дослідження фізико-хімічних та сорбційних властивостей таких матеріалів.

**Метою роботи** є синтез гранульованих сорбційних матеріалів на основі лапоніту та альгілату натрію іонотропно зміцнених іонами заліза та цирконію й вивчення їх структури та сорбційних властивостей щодо видалення метиленового блакитного з водних розчинів. Дослідження впливу співвідношення іонів заліза/цирконію у вихідних розчинах зміцнення на ефективність вилучення метиленового блакитного є також метою роботи.

**Виклад основного матеріалу.** Для досліджень було використано наступні матеріали та реагенти: лапоніт  $\text{H}_{12}\text{Li}_2\text{Mg}_{16}\text{Na}_2\text{O}_{72}\text{Si}_{24}$  (ВУК), альгілат натрію, хлорид феруму (III) гексагідрат  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Реахім, х.ч.), оксихлорид цирконію октагідрат  $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (Реахім, х.ч.), Метиленовий блакитний  $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Реахім, х.ч.).

Для синтезу гранульованих зразків композиту було використано наступну методику. Готували розчин (1,5% мас.) альгілату натрію та суспензію лапоніту (1,5% мас.), витримували при постійному перемішуванні протягом 24 годин до одержання гомогенних систем. Наважку розчину альгілату натрію та суспензії лапоніту змішували у масовому співвідношенні 1:1 та перемішували на магнітній мішалці протягом 5 годин. Отриману гомогенізовану суспензію по краплях додавали в розчини  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{ZrOCl}_2$ , та суміші  $\text{FeCl}_3$  з  $\text{ZrOCl}_2$ . За рахунок іонотропного золь-гель переходу формуються гранули сферичної форми. Отримані гранули залишали в розчинах заліза/цирконію на 24 години, після чого відділяли від розчину, промивали дистильованою водою до постійної величини рН промивної води та зберігали в дистильованій воді до подальшого використання у дослідженнях. Розчини містили залізо та цирконій у наступних молярних відсотках: 1. Fe – 100%, 2. Fe – 75%, Zr – 25%; 3. Fe – 50%, Zr – 50%; 4. Fe – 25%, Zr – 75%; 5. Zr – 100 %.

Для вивчення сорбційних властивостей синтезованих матеріалів було використано стандартну

методику. Для цього в конічні колби об'ємом 100 мл додавали 0,25–1 г адсорбенту та 50 мл розчину МБ з певною концентрацією та величиною рН. Колби поміщали на струшувач та залишали на 5 годин до досягнення сорбційної рівноваги. Аналіз залишкової концентрації іонів МБ проводили з використанням спектрофотометра UNICO-UV 2100 при довжині хвилі 665 нм. У якості розчинів порівняння було використано дистильовану воду.

Реологічні властивості вихідних суспензій лапоніту, альгілату та суміші лапоніту з альгілатом у різних співвідношеннях було вивчено за допомогою ротацийного віскозиметра (RHEOTEST-2) з постійним термостатуванням при 25°C. Зразки суспензій лапоніту та альгілату готували за допомогою ультразвукового диспегатора УЗДН-2Т (частота 22 кГц, інтенсивність 5 Вт/см<sup>2</sup>, регулятор потужності на позначці 4). Кінцева концентрацією лапоніту та альгілату складає 1,5 % (мас.). Отримані гомогенні суспензії лапоніту та розчин альгілату натрію змішували у відповідних масових співвідношеннях та перемішували протягом 2 годин до одержання гомогенних систем. Для вимірювань використано діапазоні швидкостей від 0,05 до 437,4 с<sup>-1</sup>.

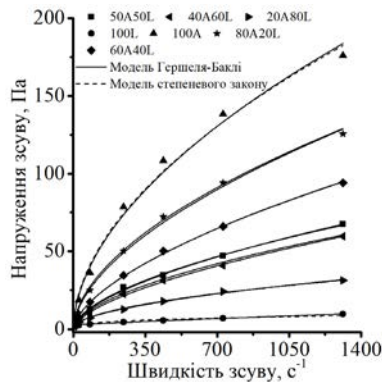
Дослідження вихідних дисперсних систем є важливою складовою відпрацювання технології виготовлення гранульованих зразків, оскільки фізико-механічні властивості та форма утворюваних гранул методом іонотропного гелеутворення достатньо сильно залежить від реологічних характеристик вихідної системи. З цією метою було досліджено систему лапоніт–альгілат натрію з різним масовим співвідношенням вихідних компонентів. У якості вихідних компонентів було обрано водний розчин альгілату натрію та водну суспензію лапоніту з однаковою масовою часткою 1,5 %.

Для опису залежностей було застосовано моделі Кроса  $\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (\dot{\gamma}\tau)^m}$ , Бінгама-Шведова  $\tau = \tau_0 + \eta D_r$ , Гершеля-Баклі  $\sigma = \sigma_0 + k\dot{\gamma}^n$  та модель степеневого закону  $\sigma = k\dot{\gamma}^n$  [8, с. 37].

Опис експериментальних даних за допомогою моделі степеневого закону представлено на рисунку 1. У моделі степеневого закону  $k$  – коефіцієнт консистенції,  $n$  – показник степеневі залежності (показник нелінійності). Значення показника  $n$  свідчить про ступінь неньютоновської поведінки рідини у цьому діапазоні швидкостей зсуву. Чим менше величина  $n$ , тим більше стоншується рідина під впливом зсуву в даному діапазоні швидкостей зсуву і тим менш нелінійним є графік залежності напруження зсуву від швидкості зсуву.

Враховуючи розраховані коефіцієнти рівняння степеневого закону (табл. 1) та форму кривих течії

можна зробити висновок, що усі досліджувані склади являють собою неньютонівські псевдопластичні рідини, які «розріджуються» при зсуві.



**Рис. 1.** Криві течії систем альгінат натрію-лапоніт з різним співвідношенням компонентів. Безперервною та пунктирною лінією продемонстровано моделі Гершеля-Баклі та степеневого закону, відповідно

Ступенева модель має переваги для врахування нелінійних складових, але вона недостатньо добре описує реологічні властивості подібних систем при низьких швидкостях зсуву, перш за все тому, що не передбачає існування характерної для них границі міцності коагуляційної структури (граничне напруження зсуву). Для врахування такої величини при описі експериментальних даних було застосовано модель Гершеля-Баклі (рис. 1).

Одержані коефіцієнти рівнянь вказують на наявність граничного напруження зсуву лише у двох зразків: 20A80L та 100L. Для суспензії лапоніту (100L) величина розрахованого граничного напруження зсуву ( $\tau_0$ ) складає 2,68 Па, а для суспензії що містить 20% за масою альгінату натрію (20A80L) величина  $\tau_0$  складає 1,06 Па. Зразки з більшим вмістом альгінату натрію вже не мають величини граничного напруження зсуву ( $\tau_0 = 0$ ).

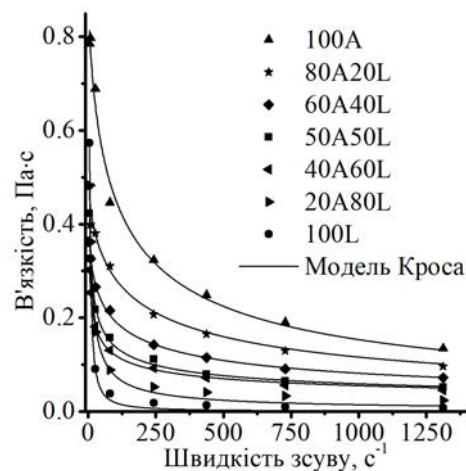
Такі результати пояснюються наявністю коагуляційних структур в суспензіях лапоніту типу «картковий будинок» та зникненням їх при наявності в системі полімерних молекул альгінату, які адсорбуються на бічних гранях частинок мінералу та унеможливають взаємодію частинок лапоніту по схемі «ребро-грань». Водночас, одноіменний негативний заряд та шар молекул альгінату навколо частинок лапоніту створює так звану електростеричну стабілізацію [9, с. 254].

У моделі Кроса (рис. 2)  $\eta_\infty$  – асимптота в'язкості для дуже високої швидкості зсуву,  $\eta_0$  – в'язкість при нульовій швидкості зсуву,  $\tau$  та  $m$  – константи, специфічні для рідини, що визначають форму кривої. Результати вказують, що криві в'язкості

добре описуються за допомогою моделі Кроса, особливо за низьких швидкостей зсуву.

Значення часу релаксації ( $\tau$ ) можна пов'язати з характерним часовим масштабом, протягом якого матеріал послаблює свою напругу під час деформації. Менший час релаксації вказує на швидшу реакцію релаксації, тоді як більший час релаксації свідчить про повільнішу реакцію релаксації. У цьому випадку значення часу релаксації відрізняються для різних зразків, що вказує на відмінності в поведінці релаксації. Значення константи швидкості ( $m$ ) можна пов'язати із відношенням модуля в'язкості до модуля пружності в моделі Кроса. Вища константа швидкості передбачає вищий внесок в'язкості відносно пружного внеску, що вказує на більш виражену в'язку поведінку матеріалу.

Зразок із 100% альгінату має відносно малий час релаксації та помірну константу швидкості, що свідчить про дещо швидшу реакцію релаксації та збалансовану в'язкопружну поведінку. Зразки з більшою часткою лапоніту (зразки 40A60L; 50A50L; 20A80L) демонструють значно більший час релаксації, що підтверджується величинами ( $\tau$ ). Ці зразки також мають нижчі значення константи швидкості, що свідчить про більш виражену пружну поведінку порівняно з в'язкою.



**Рис. 2.** Криві в'язкості систем альгінат натрію-лапоніт з різним співвідношенням компонентів. Безперервною лінією продемонстровано модель Кроса

Зразок із 100% лапоніту має відносно помірний час релаксації та найвищу константу швидкості серед зразків, що вказує на швидшу реакцію релаксації та більший внесок в'язкої поведінки. Загалом результати свідчать про те, що присутність і частка лапоніту у зразках впливають на поведінку релаксації та відносний внесок пружних і в'язких компонентів, як описано у моделі Кроса.

Застосування згаданих вище моделей для опису експериментальних даних дало змогу розрахувати відповідні коефіцієнти рівнянь реологічних моделей, які представлено в таблиці 1.

Модель Бінгама-Шведова часто застосовують для опису реологічних кривих систем на основі глинистих мінералів, особливо їх висококонцентрованих суспензій. В таких системах чітко спостерігається псевдопластична поведінка з наявністю граничного напруження зсуву ( $\tau_0$ ) завдяки формування безперервної структурної сітки частинок мінералу. Така система починає рух лише при значеннях напружень зсуву, що перевищують енергію руйнування структурної сітки. Після цього система поводить себе як в'язка рідина.

Застосування моделі Бінгама-Шведова до фрагменту кривих течії при високих швидкостях зсуву (рис. 3а) дає змогу розрахувати величини пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву досліджуваних систем. Аналіз залежностей зміни пластичної в'язкості та граничного напру-

ження зсуву від складу системи (лапоніт-альгінат) дає змогу визначити оптимальний вміст компонентів для виготовлення якісних гранул композиту та зменшення відсотку браку.

Відомо, що водні суспензії лапоніту мають яскраво виражену здатність до утворення тиксотропних систем. Явище тиксотропії негативно впливає на процес формування, оскільки ускладнюється як відрив краплі так і формування сферичної форми гранули в момент падіння та контакту з розчином. Застосування альгіанату натрію дозволяє змінити реологічну поведінку суспензії лапоніту. Полімерні молекули альгіанату здатні до адсорбції на позитивно заряджених бічних гранях частинок лапоніту, що призводить до унеможливлення формування тиксотропних структур типу «картковий будинок».

Дія альгіанату натрію схожа з дією розріджувачів (дефлокулянтів) таких як поліфосфати, силікати та інші [9, с. 258].

На основі одержаних даних (рис. 3б) встановлено, що збільшення вмісту лапоніту позитивно

Таблиця 1

Коефіцієнти рівнянь реологічних моделей

Зразок	Модель											
	Степінного закону			Гершеля-Баклі				Кросса				
	K	n	R <sup>2</sup>	$\tau_0$	K	n	R <sup>2</sup>	$\eta_{sp}$	$\eta_0$	$\tau$	m	R <sup>2</sup>
100A	3,98	0,53	0,9905	0	3,68	0,54	0,9883	0	0,93	0,010	0,69	0,9843
80A20L	2,11	0,57	0,9947	0	2,40	0,55	0,9926	0	0,51	0,007	0,63	0,9701
60A40L	1,19	0,61	0,9983	0	1,18	0,61	0,9980	0	0,47	0,02	0,52	0,9955
40A60L	0,76	0,61	0,9985	0	0,96	0,58	0,9939	0	1,58	10,43	0,36	0,9972
50A50L	0,97	0,59	0,9979	0	1,10	0,57	0,9970	0	1,80	3,35	0,43	0,9874
20A80L	0,82	0,51	0,9966	1,06	0,57	0,55	0,9976	0	1,44	0,48	0,75	0,9910
100L	1,00	0,30	0,8455	2,68	0,01	0,87	0,9860	0	4,03	0,81	1,22	0,9969

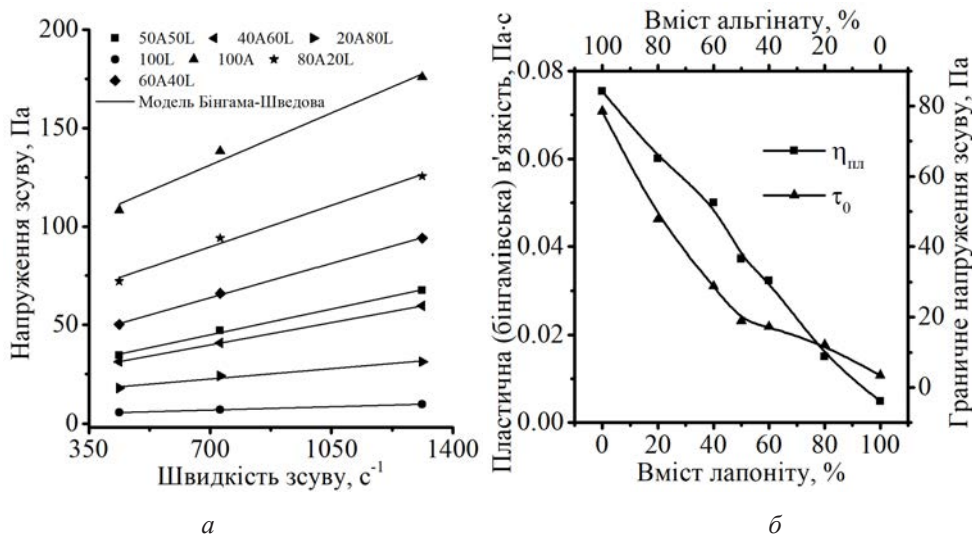


Рис. 3. Фрагменти кривих течії систем альгінат натрію-лапоніт із застосуванням моделі Бінгама-Шведова (а); залежність пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву від співвідношення альгінат-лапоніт (б)

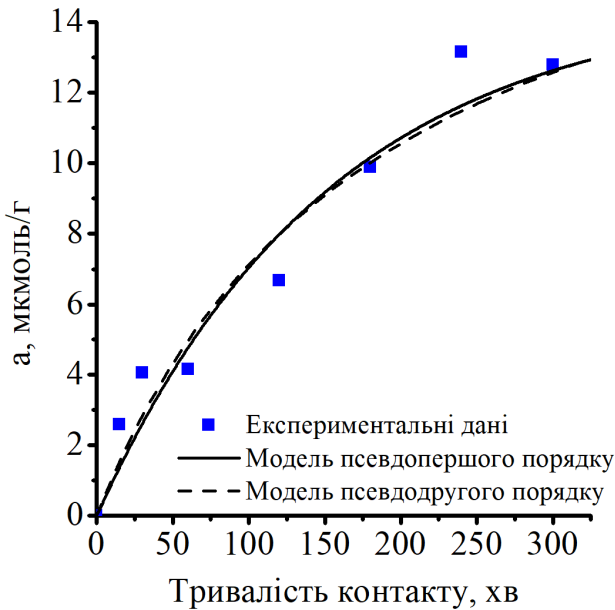


Рис. 4. Кінетика сорбції метиленового блакитного (МБ) зразком Fe100

впливає на реологічні характеристики системи. Спостерігається зниження величини пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву. Величина граничного напруження зсуву має екстремум біля вмісту 50%. Тому такий склад було обрано для синтезу зразків гранульованих композитів.

Для гранульованих зразків будь-яких адсорбентів одним з важливих параметрів є кінетика сорбції. Розміри гранул, пористість та структура зразка значним чином впливає на швидкість проникнення адсорбату в об'єм гранули. Дифузійні процеси багато в чому залежать як від стану адсорбенту, так і від фізико-хімічних властивостей адсорбату. Одержані результати показують, що для зразка Fe100 (рис. 4) спостерігається значна різниця у встановленні адсорбційної рівноваги при вилученні метиленового блакитного (МБ). Для МБ термін встановлення адсорбційної рівноваги складає 200–250 хв. Це обумовлено перш за все достатньо великим розміром молекул (іонів  $\text{MB}^+$ ). За літературними даними [10, с. 162] радіус катіона  $\text{MB}^+$ , враховуючи розміри молекули ( $17.0 \times 7.6 \times 3.3 \text{ \AA}$ ), складає  $\approx 8,5 \text{ \AA}$ .

Крім того, іони  $\text{MB}^+$  при достатньо високих концентраціях можуть утворювати асоціати

(димери, тримери) в розчині [11, с. 450], а також на поверхні матеріалу. Особливо сильний вплив на швидкість дифузії матиме явище утворення поверхневих асоціатів в мікропорах матеріалу.

Дифузія іонів  $\text{MB}^+$  в об'єм гранули може сповільнюватися карбоксильними групами альгілату та активними (іонообмінними) центрами частинок лапоніту у приповерхневих шарах гранул. Це призводить до утворення градієнтного розподілу концентрації адсорбованого МБ по напрямку від поверхні гранули до її центру.

Кінетична крива (рис. 4) описана за допомогою двох відомих моделей: псевдопершого  $Q_t = Q_e \cdot (1 - e^{-k_1 t})$  та псевдодругого порядку  $Q_t = \frac{k_2 \cdot Q_e^2 \cdot t}{1 + k_3 \cdot Q_e \cdot t}$  [12, с. 15]. Де  $k_1$  – константа швидкості моделі псевдопершого порядку;  $Q_e$  та  $Q_t$  – сорбційна ємність в стані рівноваги та в момент часу  $t$  відповідно,  $k_2$  – константа швидкості моделі псевдодругого порядку. Розраховані коефіцієнти моделей представлено в таблиці 2.

Встановлено, що експериментальні дані однаково добре описуються за допомогою представлених моделей, що підтверджується близькими до 1 значеннями коефіцієнтів кореляції  $R^2$ . Це дозволяє застосовувати моделі псевдопершого та псевдодругого порядку для опису хімічної стадії процесу сорбції. В рамках моделі кінетики сорбції псевдодругого порядку було розраховано константи швидкості процесу (табл. 2). Константи швидкості псевдопершого порядку мають вищі значення. Це може бути пов'язано з значним часом встановлення рівноваги в системі. У моделі псевдодругого порядку швидкість процесу адсорбції визначається швидкістю стадії хімічної взаємодії між сорбатом та сорбентом.

Враховуючи складну структуру гранульованих зразків, які фактично є гідрогелями, та аналіз літературних джерел [13, с. 4], можна припустити, що вони є мікропористими та можуть проявляти деякий молекулярно-ситовий ефект. Іони  $\text{MB}^+$  адсорбуються переважно на іонообмінних позиціях частинок лапоніту та карбоксильних груп альгілату. Однак, за певних умов, активними центрами можуть виступати гідроксильні групи  $=\text{Fe}-\text{OH}$ .

Ізотерми сорбції вказують на достатньо значний вплив хімічного складу зразків композитів

Таблиця 2

Параметри кінетичних моделей псевдо-першого і псевдо-другого порядків для сорбції МБ (зразок Fe100)

Зразок	Модель псевдопершого порядку			Модель псевдодругого порядку		
	$Q_e$ (мкмоль/г)	$k_1$ (хв <sup>-1</sup> )	$R^2$	$Q_e$ (мкмоль/г)	$k_2$ (г/(мкмоль·хв))	$R^2$
Fe100	14,7	$6,53 \cdot 10^{-3}$	0,9504	20,4	$2,63 \cdot 10^{-4}$	0,9501

Коефіцієнти рівнянь адсорбції метиленового блакитного зразками гранульованих композитів (рН 6)

Зразок	За Фрейндліхом			За Ленгмюром		
	$K_F$ дм <sup>3</sup> /мкмоль	n	R <sup>2</sup>	$K_L$ дм <sup>3</sup> /мкмоль	$a_{\infty}$ мкмоль/г	R <sup>2</sup>
Fe100	5,20	4,2	0,8824	0,0391	22,03	0,9528
Zr25Fe75	0,97	2,2	0,9308	0,0068	19,01	0,9333
Zr50Fe50	0,21	1,9	0,9586	0,0037	8,76	0,9899
Zr75Fe25	0,18	1,7	0,9740	0,0025	12,52	0,9920
Zr100	0,33	2,0	0,9579	0,0043	10,88	0,9878

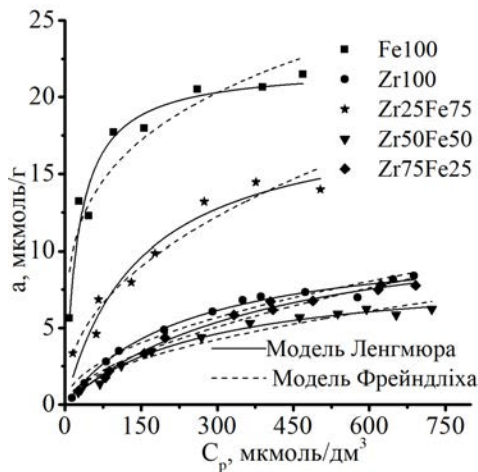


Рис. 5. Ізотерми сорбції метиленового блакитного зразками гранульованих композитів (рН 6)

на величину сорбції (рис. 5). Аналіз одержаних результатів вказує на те, що кращі зразки відрізняються співвідношенням Zr:Fe у розчинах для іонотропного зміцнення.

Така залежність пояснюється перш за все особливостями іонів метиленового блакитного, який може перебувати у вигляді катіонів МБ<sup>+</sup> або за високих концентрацій у формі димерів (МБ<sup>+</sup>)<sub>2</sub> або тримерів (МБ<sup>+</sup>)<sub>3</sub>, які добре сорбуються на негативно заряджених центрах зразків композитів [14, с. 93].

Вилучення метиленового блакитного зразками гранульованих композитів значно стримується дифузиею великих молекул барвника в структуру адсорбенту. Активними центрами, що можуть приймати участь у зв'язуванні молекул (іонів) МБ, можуть бути іонообмінні центри на базальній поверхні частинок лапоніту, депротоновані карбоксильні групи (-COO<sup>-</sup>) альгінату а також депротоновані гідроксильні групи наприклад =ZrO<sup>-</sup> та =FeO<sup>-</sup>.

Застосування моделей Ленгмюра  $a = \frac{K_L \cdot a_{\infty} \cdot C_p}{1 + K_L \cdot C_p}$  та Фрейндліха  $a = K_F \cdot C_p^{\frac{1}{n}}$  до одержаних ізотерм сорбції дає можливість визначити величини коефіцієнтів відповідних рівнянь, які наведені в таблиці 3. Величини коефіцієнтів кореляції R<sup>2</sup> в межах зна-

чень 0,95–1 вказують на можливість застосування пропонуємої моделі для опису процесів сорбції іонів МБ зразками гранульованих композитів. В більшості випадків модель Ленгмюра краще описує експериментальні дані, що підтверджується більшими значеннями коефіцієнтів кореляції (R<sup>2</sup>), ніж для моделі Фрейндліха.

Для досліджуваних зразків композитів спостерігається зниження величин граничної сорбції (a<sub>∞</sub>, мкмоль/г) та спорідненості при зміні співвідношення Zr:Fe у розчинах зміцнення, що видно зі зміни величин константи адсорбційної рівноваги (K<sub>L</sub>).

Модель Фрейндліха дещо гірше описує ізоТЕРМИ сорбції, і хоча є емпіричною, проте її коефіцієнти все одно носять деякий фізичний сенс та можуть бути використані для додаткової характеристики одержаних результатів та порівняння зразків. Значення K<sub>F</sub> пов'язане з енергією взаємодії адсорбента і адсорбата, і його вищі значення вказують на більш сильну взаємодію, тобто вищу спорідненість або в деякій мірі селективність. Інший же коефіцієнт n, відомий як показник Фрейндліха або константа інтенсивності адсорбції, значення якої зазвичай лежить в межах від 1 до 10, а більші значення вказують на те, що адсорбент має більшу спорідненість до молекул(іонів) адсорбату при низьких концентраціях. Якщо n = 1, адсорбція є лінійною відносно зміни концентрації, якщо n < 1, ємність адсорбції зменшується.

Розраховані коефіцієнти рівняння Ленгмюра для ізотерм сорбції досліджуваних адсорбатів дає можливість визначити найбільш ефективний зразок для вилучення метиленового блакитного. Так, найбільша величина граничної адсорбції (a<sub>∞</sub>) у випадку вилучення МБ належить зразку Fe100 (22.03 мкмоль/г). Константа рівноваги (K<sub>L</sub>) вказує на енергію взаємодії між адсорбатом та адсорбентом. Вищі значення константи рівноваги вказують на більш сильну взаємодію (спорідненість) між адсорбентом та адсорбатом, тобто більш ефективну адсорбцію.

Таким чином, беручи до уваги величину константи рівноваги (K<sub>L</sub>), можна судити щодо ефек-



тивності застосування адсорбенту для вилучення певного типу адсорбату з розчинів його низької концентрації, оскільки константа вказує на рівень спорідненості та, в деякій мірі, енергію зв'язку. За цим принципом найбільш ефективним зразком для вилучення метиленового блакитного Fe100 (0,0391 дм<sup>3</sup>/мкмоль).

Отже, синтезовані гранульовані композити можуть розглядатись як альтернативні сорбційні матеріали для використання у процесах очищення забруднених вод від катіонних барвників, зокрема метиленового блакитного.

**Висновки.** На основі одержаних залежностей встановлено, що додавання альгінату натрію до суспензій лапоніту у масовому співвідношенні 1:1 дозволяє одержати суспензії з оптимальними реологічними характеристиками для створення якісних гранул композитів.

Показано, що синтезовані гранульовані композити можуть бути застосовані для ефективного вилучення метиленового блакитного з водних розчинів. Встановлено, що найбільш ефективними є зразки, синтезовані із застосуванням розчинів твердіння з максимальним вмістом заліза.

#### Список літератури:

1. Wu Z., Zhang L., Guan Q., Ning P., Ye D. Preparation of  $\alpha$ -zirconium phosphate-pillared reduced graphene oxide with increased adsorption towards methylene blue *Chemical Engineering Journal*. 2014. Т. 258. Pp. 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.064>
2. Пилипенко І.В., Спасьонова Л.М., Ковальчук І.А., Веремеєнко В.В. Сорбція іонів кобальту, хрому та урану Fe/Ti-пілардованим монтморилонітом. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Т. 4. №. 6. С. 57–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26246>
3. Fernandes J.V., Rodrigues A.M., Menezes R.R., Neves G.A. Adsorption of anionic dye on the acid-functionalized bentonite. *Materials*. 2020. Т. 13. №. 16. Pp. 3600. <https://doi.org/10.3390/ma13163600>
4. Пилипенко І.В. Гранульований композит для видалення іонів кобальту та метиленового голубого. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Т. 2. №. 11 (68). Pp. 16-20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22937>
5. Das T.K., Scott Q., Bezbaruah A.N. Montmorillonite-iron crosslinked alginate beads for aqueous phosphate removal. *Chemosphere*. 2021. Т. 281. Pp. 130837. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130837>
6. Kumar I.A., Viswanathan N. Fabrication of metal ions cross-linked alginate assisted biocomposite beads for selective phosphate removal. *Journal of environmental chemical engineering*. 2017. Т. 5. №. 2. Pp. 1438-1446. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.02.005>
7. Qing Z., Wang L., Liu X., Song Z., Qian F., Song Y. Simply synthesized sodium alginate/zirconium hydrogel as adsorbent for phosphate adsorption from aqueous solution: Performance and mechanisms. *Chemosphere*. 2022. Т. 291. №. 3. Pp. 133103. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133103>
8. Wagner N.J., Mewis J. Theory and applications of colloidal suspension rheology. Cambridge University Press, 2021. 437 p. <http://dx.doi.org/10.1515/arh-2012-0001>
9. Landrou G., Brumaud C., Plötze M.L., Winnefeld F., Habert G. A fresh look at dense clay paste: Deflocculation and thixotropy mechanisms. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. Т. 539. Pp. 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.12.029>
10. Ahmed M.J., Okoye P.U., Hummadi E.H., Hameed B.H. High-performance porous biochar from the pyrolysis of natural and renewable seaweed (*Gelidiella acerosa*) and its application for the adsorption of methylene blue. *Bioresour. Technol.* 2019. Т. 278. Pp. 159–164. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.054>
11. Fernández-Pérez A., Valdés-Solís T., Marbán G. Visible light spectroscopic analysis of Methylene Blue in water; the resonance virtual equilibrium hypothesis *Dyes and Pigments*. 2019. Т. 161. Pp. 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.09.083>
12. Zafar S., Khalid N., Daud M., Mirza M.L. Kinetic studies of the adsorption of thorium ions onto rice husk from aqueous media: Linear and nonlinear approach. *The Nucleus*. 2015. Т. 52. №. 1. Pp. 14-19.
13. Xi H., Li Q., Yang Y., Zhang J., Guo F., Wang X., Xu S., Ruan S. Highly effective removal of phosphate from complex water environment with porous Zr-bentonite alginate hydrogel beads: Facile synthesis and adsorption behavior study. *Applied Clay Science*. 2021. Т. 201. Pp. 105919. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105919>
14. Schoonheydt R.A., Heughebaert L. Clay adsorbed dyes: methylene blue on laponite *Clay Minerals*. 1992. Т. 27. №. 1. Pp. 91-100. <https://doi.org/10.1180/claymin.1992.027.1.09>

#### **Pylypenko I.V. GRANULAR COMPOSITES BASED ON LAPONITE AND SODIUM ALGINATE FOR REMOVAL OF METHYLENE BLUE FROM AQUEOUS SOLUTIONS**

*The article presents a study on the rheological characteristics of Laponte suspensions with the addition of sodium alginate. It has been established that all investigated compositions exhibit non-Newtonian pseudoplastic*

*behavior, characterized by shear thinning. Furthermore, the presence of yield stress is observed only in the pure Laponte suspension and the 20% alginate sample. It is shown that the presence of sodium alginate influences the formation of structures in the system and alters its rheological behavior. The application of rheological models such as Cross, Herschel-Bulkley, Bingham-Shvedov, and Power law enables the description of experimental data and calculation of the coefficients for these models. The dependencies of plastic viscosity and yield stress on the system composition allow for determining the optimal content of components for the production of high-quality composite granules with reduced waste percentage. The adsorption process of methylene blue using synthesized granulated composites is investigated. It is found that the adsorption equilibrium is established after 250-300 minutes of contact between the solid and liquid phases. The kinetic curve is described by two models: pseudo-first-order and pseudo-second-order. These models exhibit a high correlation with experimental data, allowing their use in describing the kinetics of methylene blue adsorption processes. It is determined that methylene blue ions adsorb on ion exchange sites of Laponte particle and carboxyl groups of alginate, while hydroxyl groups =Fe-OH can also serve as active adsorption centers. The correlation coefficient values indicate the possibility of using the Langmuir and Freundlich models, with the Langmuir model providing a better fit to the experimental data. A decrease in adsorption capacity and affinity is observed with a change in the Zr:Fe ratio in strengthening solutions. Calculations demonstrate that the Fe100 sample exhibits the highest adsorption capacity and equilibrium constant, indicating its highest efficiency in dye removal. The synthesized granulated composites can be utilized as effective sorbent materials for water purification from cationic dyes, particularly methylene blue.*

**Key words:** *laponte, granulated nanocomposite, sorption removal, alginate granules, dyes, methylene blue.*

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/14>**Пилипенко О.І.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Смірнов О.О.**

Національний науковий центр «Інститут судових експертиз імені Заслуженого професора М.С. Бокаріуса»

**Зайцева І.С.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Панайотова Т.Д.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

## ПОВЕДІНКА ТИТАНУ VT1-0 В УМОВАХ АНОДНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ У СИСТЕМІ «ЕТИЛЕНГЛІКОЛЬ – ВОДА – HF – NH<sub>4</sub>F»

Наведені результати дослідження поведінки титану марки VT1-0 в умовах анодної поляризації у фторидвмісних електролітах з використанням змішаного органічно-водного розчинника. Результати поляризаційних вимірювань показують, що поляризаційні залежності титану у вказаних електролітах характеризуються складною формою, що ускладнює їх інтерпретацію. Форма одержаних поляризаційних залежностей є відображенням складних процесів, що протікають на поверхні аноду – хімічної взаємодії з компонентами електроліту, електрохімічного розчинення під дією анодної поляризації та формування оксидних пасивуючих шарів значному зміщенні потенціалу титану у область позитивних значень. Тому особливості електрохімічної поведінки титану залежать від складу розчину. Анодні поляризаційні залежності, одержані у розчинах з різним співвідношенням етиленгліколь:вода, дозволяють зробити наступні висновки: 1) крива, одержана у розчині зі співвідношенням  $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 50:50$  об. % має форму, характерну для поляризаційної кривої металу, схильного до пасивації при анодній поляризації; 2) підвищення об'ємної частки спирту в електроліті з 50 до 70 об. % обумовлює зниження густини струму у всьому діапазоні потенціалів анода до початку пасивації. Очевидно, що у даному випадку етиленгліколь виконує роль інгібуючої добавки, що уповільнює протікання електрохімічних процесів на поверхні титану; 3) починаючи зі співвідношення  $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 70:50$  і далі на кривих спостерігається зсув потенціалу піку у область позитивних значень. Анодні поляризаційні залежності титанового електрода у змішаному органічно-водному електроліті в умовах зміни концентрації фториду амонію вказують, що поведінка титану в умовах поляризації характеризується наявністю областей, що відповідають розчиненню металу та формуванню поверхневих оксидних плівок в певних областях потенціалів, що мають визначені значення для кожної концентрації солі у розчині. Одержані результати являють інтерес для розробки технології електрохімічного формування оксидних покриттів функціонального призначення.

**Ключові слова:** оксидна плівка, пасивація, поляризаційна залежність, анодне розчинення, іоні-активатори, фториди, етиленгліколь.

**Постановка проблеми.** Електроліти на основі органічно-водних розчинників використовуються для електрохімічного одержання оксидних плівок різної структури на вентильних металах. Застосування змішаних розчинників обумовлене декількома причинами. По-перше, їх використання дозволяє істотно знизити травлячу дію електроліту на утворену на оксидну плівку. Органічна складова, яка входить до складу таких електролітів, має менше значення діелектричної сталої і тому

подавляє дисоціацію розчиненого електроліту або сприяє утворенню у розчині різних типів асоціатів. По-друге, органічні речовини, як правило, володіють поверхнево-активними властивостями, що сприяє кращому змочуванню поверхні електрода та у значній мірі виключає місцеве розтравлювання оксидної плівки внаслідок хімічної взаємодії з компонентами розчину. Сукупна дія першого та другого факторів приводить до того, що використання змішаних розчинників поруч

з введенням до складу електроліту іонів-активаторів дає змогу проводити електрохімічне формування оксидних плівок, які характеризуються впорядкованою пористістю [1]. Такі плівки знайшли використання у якості каталізаторів [2], матриці при одержанні наноструктур методами електрохімічного осадження [3], основи сенсорів [4] та функціонального покриття імплантатів медичного призначення [5, 6]. В останньому випадку наявність пористості дозволяє значно збільшити поверхню металу, що забезпечує більшу площу взаємодії і обумовлює надійний контакт оточуючих тканин з імплантатом. Незважаючи на велику кількість публікацій, присвяченій тематиці електрохімічного одержання оксидних плівок на вентильних металах, анодна поведінка титану і його сплавів у змішаних електролітах висвітлена явно недостатньо. Тому, зважаючи на перспективність електрохімічного формування оксидних плівок на титанових матеріалах, обраний напрямок досліджень є безумовно актуальним.

**Метою дослідження** є проведення поляризаційних досліджень технічного титану ВТ1-0 у фторидвмісних електролітах на основі змішаного розчинника.

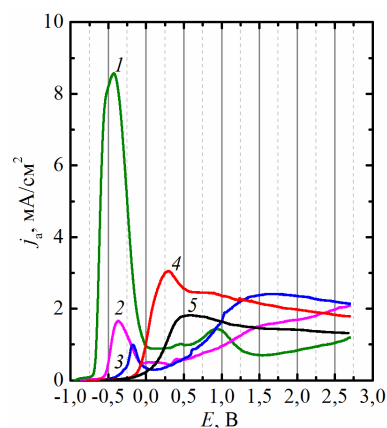
Задачі дослідження були наступні: 1) провести поляризаційні дослідження впливу вмісту етиленгліколю та води у розчині на анодну поведінку титану марки ВТ1-0 у змішаному електроліті з додаванням фторидної кислоти і фториду амонію; 2) провести поляризаційні дослідження впливу вмісту фториду амонію на анодну поведінку титану марки ВТ1-0 у фторидвмісному електроліті з етиленгліколь-водним розчинником.

**Методика проведення експерименту.** Для проведення досліджень використовували зразки титану ВТ1-0 у вигляді прутків діаметром 4 мм і довжиною 100 мм. Зразки перед проведенням досліджень обробляли за стандартною методикою, яка включала шліфування, знежирення, промивання та сушку. У якості допоміжного електрода використовували титанову пластину; площа катоду в 10 разів перевищувала площу аноду. Поляризаційні вимірювання проводили у комірці, виготовленій з поліпропілену. Потенціали вимірювали відносно насиченого аргентумхлоридного електрода та перераховували в шкалу нормального водневого електрода. Для проведення електрохімічних досліджень використовували потенціостат-гальваностат МТех PGP-550М з програмним забезпеченням від розробника.

**Результати дослідження.** Результати поляризаційних досліджень анодної поведінки тита-

нового електрода у етиленгліколь-водних розчинах з додаванням фториду амонію наведені на рис. 1 і 2. Отримані дані показують, що поведінка титану ВТ1-0 у змішаних органічно-водних розчинах характеризується одночасним протіканням декількох процесів, що включають хімічне травлення титану внаслідок активації поверхні фторид-іонами за відсутності зовнішньої анодної поляризації, активним розчиненням титану за низьких значень поляризації, електрохімічними процесами формування пасивуючих шарів при значному зміщенні потенціалу титану у область позитивних значень [8].

Наочним відображенням вищевказаного є одержані криві, аналіз яких дозволяє зробити декілька важливих висновків. Наприклад, на рис. 1 показані поляризаційні залежності, одержані в умовах анодної поляризації зразків у розчинах з різним співвідношенням етиленгліколь:вода. Залежність, одержана при співвідношенні  $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 50:50$  (рис. 1, залежність 1), має форму, характерну для поляризаційної кривої металу, схильного до пасивації при анодній поляризації.



**Рис. 1. Анодні поляризаційні залежності титану ВТ1-0 у етиленгліколь-водних електролітах.**  
 $c(HF) = 3,36 \text{ г/дм}^3$ ;  $c(NH_4F) = 50 \text{ г/дм}^3$ .  
 $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O)$ , об. %: 1 – 50:50;  
 2 – 60:40; 3 – 70:30; 4 – 80:20; 5 – 90:10

На кривій можна виокремити ділянки, які відповідають області активного розчинення титану (від стаціонарного потенціалу до потенціалу піку, що відповідає потенціалу пасивації електрода) та область, яка характеризує пасивний стан металу. У цій області спостерігається спад густини струму до значень 0,8–1,4  $\text{mA/cm}^2$ . Слід відзначити, що виходу на стаціонарне значення густини струму не відбувається. На кривій помітний плавний підйом струму з виходом на максимум при потенціалі

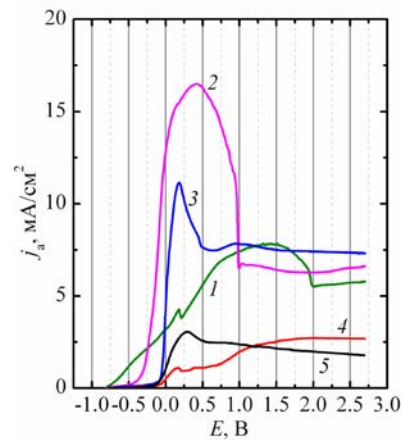
приблизно +0,75 В з подальшим поступовим зниженням до 0,8 мА/см<sup>2</sup>. Виділення кисню на зразках не відбувається, що свідчить про формування стійкого пасивного шару на поверхні титану; водночас значення густин струму у цій області пасивації мають істотні значення, обумовлені хімічними процесами розчинення пасивуючої плівки у електроліті [12].

Останнє спостереження дозволяє зробити висновок про те, що анодну обробка титану у етиленгліколь-водних розчинах можна розглядати як спосіб комбінованого травлення, що включає процеси електрохімічного розчинення та пасивації титану при поляризації і хімічне розчинення металу за її відсутності. Використання електрохімічних прийомів у даному випадку дозволяє регулювати товщину знятого металу, а хімічне розчинення – отримати розвинену поверхню зразків [7].

З наведеного рисунку видно, що збільшення частки спирту в електроліті з 50 до 70 об. % обумовлює зниження струму у діапазоні потенціалів електрода до початку пасивації. Очевидно, що у даному випадку етиленгліколь виконує роль інгібувальної добавки, що уповільнює протікання електрохімічних процесів на поверхні титану. Цікавим спостереженням є те, що при потенціалах, більш позитивних, ніж (+0,88)–(+1,17) В струм в області пасивного стану у цих розчинах вищий, ніж при співвідношенні  $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 50:50$ , тобто ефект інгібування зникає. Можливо, це пов'язане з адсорбцією етиленгліколю і покращенням змочуваності поверхні титану при підвищенні вмісту спирту, що обумовлює краще відведення продуктів анодних реакцій у об'єм електроліту. Починаючи зі співвідношення  $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 70:50$  і далі на кривих спостерігається зсув потенціалу піку у область позитивних значень. Взагалі при зміні співвідношення від 50:50 до 80:10 потенціал початку пасивації зсувається від -0,430 до +0,288 В; при співвідношенні 90:10 максимуму струму не спостерігається.

Поляризаційні залежності, одержані на титановому електроді у електролітах з різною концентрацією фториду амонію (рис. 2), вказують, що поведінка досліджених зразків в умовах поляризації характеризується наявністю областей, що відповідають активному розчиненню та формуванню поверхневих пасивуючих плівок в областях потенціалів, що мають визначені значення для кожної концентрації фториду амонію у розчині. Поляризаційні залежності титану у етиленгліколь-водних фторидвмісних електролітах за умов варіювання концентрації фториду амонію харак-

теризуються наявністю піків різної форми, потенціал максимуму яких має різні значення; це саме відноситься і до діапазону потенціалів, що відповідають протяжності області піку.



**Рис. 2.** Анодні поляризаційні залежності титану ВТ1-0 у етиленгліколь-водних електролітах.  
 $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 80:20$  об. %;  
 $c(NH_4F) = 3,36$  г/дм<sup>3</sup>.  $c(NH_4F)$ , г/дм<sup>3</sup>: 1 – 1;  
 2 – 5; 3 – 10; 4 – 25; 5 – 50

Дослідні дані показують, що підвищення концентрації фториду амонію у розчині з 1 до 5 г/дм<sup>3</sup> (рис. 1, залежності 1 і 2) обумовлює зростання густин струму у області потенціалів, що відповідає активному розчиненню титану; при цьому зміна вказаного параметру різко змінює форму кривої. Якщо для концентрації  $c(NH_4F) = 1$  г/дм<sup>3</sup> характерне поступове наростання струму у області активного розчинення при зміщенні потенціалу електрода у бік позитивних значень, то при підвищенні концентрації солі у п'ять разів область активного розчинення характеризується різким зростанням струму при анодній розгортці потенціалу, що свідчить про суттєве зменшення значення поляризаційного опору анодного процесу. Водночас густина струму в області, що відповідає формуванню пасивного шару на поверхні електрода, при підвищенні  $c(NH_4F)$  змінюється від 5,68 до 6,55 мА/см<sup>2</sup>, що не відповідає ефекту від впливу цього параметру у області активного розчинення.

Подальше підвищення концентрації солі викликає появу нових характерних особливостей ходу поляризаційних кривих. Наприклад, при  $c(NH_4F) = 10$  г/дм<sup>3</sup> область активного розчинення характеризується стрімким зростанням струму після досягнення потенціалу розкладання електроліту і закінчується гострим піком при потенціалі +0,188 В. Водночас глибокої пасивації електроду у даних умовах не відбувається, на що

вказують значення густин струму піку і стаціонарного стану (відповідно 11,14 і 7,42 мА/см<sup>2</sup>); очевидно, що даному значенню струму не відповідає утворення суцільної пасивуючої плівки, яка мала б перешкоджати протіканню електродних процесів за даних умов. Цікавим є те, що при підвищенні концентрації фториду амонію до 25 г/дм<sup>3</sup> і вище відбувається гальмування електродних процесів при анодній поляризації титану (рис. 2, відповідно криві 4 і 5). При  $c(\text{NH}_4\text{F}) = 25 \text{ г/дм}^3$  пік струму у області активного розчинення майже відсутній і має вироджену форму; в цілому взагалі можна сказати, що анодна поведінка титану у даному випадку описується як така, що не має чітко визначених зон активного розчинення і пасивації [8]. Поляризаційна крива при анодній розгортці потенціалу характеризується поступовим наростанням струму з утворенням двох хвиль і незначним перегином при  $E = +0,161 \text{ В}$ . Навпаки, при  $c(\text{NH}_4\text{F}) = 50 \text{ г/дм}^3$  на кривій присутня область, яку можна ототожнити з областю активного розчинення і яка закінчується чітко вираженим максимумом при  $E = +0,293 \text{ В}$ . Подальше зміщення анодного потенціалу обумовлює поступове зниження струму, причому при потенціалі +1,203 В спостерігається інверсія струму для розчинів, що містять 25 і 50 г/дм<sup>3</sup> фториду амонію.

Очевидно, складний характер поляризаційних залежностей, одержаних на титані VT1-0 при анодній поляризації у етиленгліколь-водних фторидвмісних електролітах, обумовлюється сукупністю хімічних та електрохімічних процесів, що протікають на поверхні титану в цій системі.

За відсутності зовнішньої поляризації поверхня титану піддається хімічному травленню завдяки наявності фторидвмісних компонентів – фторидної кислоти і фториду амонію [9, 10]. Накладання анодної поляризації приводить до протікання двох конкуруючих процесів – анодного травлення титану і формування пасивної плівки за механізмом, що відповідає електрохімічному окси-

дуванню титану. Водночас не можна виключати можливості хімічного розчинення оксиду за рахунок активуючої дії фторид-іонів.

Наявність цієї сукупності процесів обумовлює можливість проведення анодної обробки титану з формуванням високорозвиненої поверхні металу. Попередня безструмова витримка зразків дозволяє провести розвинення поверхні за рахунок хімічного травлення; застосування електрохімічних прийомів дає можливість подальшого проведення контрольованого процесу формування поверхневого шару металу, яка у електролітах з поверхнево-активними властивостями має забезпечити рівномірність обробки поверхні. Не слід виключати і можливості проведення процесу у режимі електрохімічного полірування за високих позитивних значень анодних потенціалів.

**Висновки.** Анодні поляризаційні залежності титану VT1-0 у фторидвмісних електролітах на основі змішаного розчинника на основі етиленгліколю і води характеризуються складною формою. Це пояснюється складністю процесів, які перебігають на електроді в умовах анодної поляризації та є відображення складних хімічних та електрохімічних процесів, що протікають в системі. Експериментальні дані показують, що зміна співвідношення спирту і води в електроліті неоднозначно впливає на поляризаційні залежності електрода. Зміна співвідношення  $V(\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2):V(\text{H}_2\text{O})$ , об. % від 50:50 до 70:30 обумовлює зменшення густин струму при анодній поляризації; одержані криві є характерними для залежностей метала, схильного до пасивації. При підвищенні співвідношення до 90:10 крива вироджується. Підвищення концентрації фториду амонію від 1 до 10 г/л обумовлює підвищення струму піку на поляризаційних кривих, що пояснюється підвищенням концентрації іонів-активаторів у розчині. При підвищенні концентрації фториду амонію до 25 г/л і вище значення густин струму на кривих знижуються, що пояснюється сольовою пасивацією поверхні аноду.

#### Список літератури:

1. Yu T., Yin H., Zhou Y., Wang Y., Zhu H., Wang D. Electrochemical preparation of porous Ti–13Zr–13Nb alloy and its corrosion behavior in Ringer's solution. *Mat. Trans.* 2017. Vol. 58. P. 326–330.
2. Liu J., Yi J., Li S., Yu M., Xu Y. Fabrication and characterization of anodic oxide films on a Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy. *Int. J. Miner.* Vol. 16. P. 96–100.
3. Zeng H. C. Preparation and integration of nanostructured titanium dioxide. *Curr. Opin.* 2011. Vol. 1. P. 11–17.
4. Ramanavicius S., Jagminas A., Ramanavicius A. Gas sensors based on titanium oxides (review). *Coatings.* 2022, Vol. 12. 699.
5. Smirnova O., Nikonov A., Mukhina Y., Pylypenko O. Electrochemical formation of oxide films on the titanium alloy of Ti6Al4V in ethylene glycol-water electrolytes to produce bioinert coatings and increase the corrosion resistance of medical implants. *MSF.* 2021. Vol. 1038. P. 77–84.

6. Shevchenko G., Pilipenko A., Shkolnikova T., Gura S., Smirnova O. Production of nanosize interference-colored oxide films on the Ti6Al4V alloy surface using the method of electrochemical oxydation in succinate electrolytes. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2020. P. 216–219.

7. Savvova O., Voronov G., Fesenko O., Smirnova O., Zhukov K., Pylypenko O. Using the electrochemical etching as a method for the preparation of the titanium surface to get anodic oxide films. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 348–351.

8. Pilipenko A., Smirnova O., Gura S., Skorynina-Pohrebna O., Khoroshev O., Shkolnikova T. Studying the insulating properties of oxide films obtained on the Ti6Al4V alloy in tartaric acid solutions using the method of electrochemical decoration by copper. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. P. 1657–1666.

9. Пилипенко О. І., Токайчук Т. М., Сьомкіна О. В., Смірнова О. Л., Панчева Г. М. Дослідження динаміки формування оксидних плівок на сплаві Ti6Al4V у електролітах на основі етиленгліколю. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 31. С. 213–216.

10. Savvova O. V., Zaitseva I. S., Smirnova O. L., Voronov G. K., Fesenko O. I., Pylypenko O. I. Electrochemical oxidation of Ti6Al4V titanium alloy in malic acid solutions. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 33. С. 221–225.

### **Pylypenko O.I., Smirnov O.O., Zaitseva I.S., Panayotova T.D. THE BEHAVIOR OF TITANIUM VT1-0 IN THE CONDITIONS OF ANODE POLARIZATION IN THE “ETHYLENE GLYCOL – WATER – HF – NH<sub>4</sub>F” SYSTEM**

*The results of the study of the behavior of VT1-0 titanium under conditions of anodic polarization in fluoride-containing electrolytes using a mixed organic-aqueous solvent are presented. The results of polarization measurements show that the polarization dependences of titanium in the indicated electrolytes are characterized by a complex form, which complicates their interpretation. The shape of the obtained polarization dependences is a reflection of the complex processes taking place on the surface of the anode - chemical interaction with the components of the electrolyte, electrochemical dissolution under the action of anodic polarization and the formation of oxide passivating layers, a significant shift of the potential of titanium into the region of positive values. Therefore, the features of the electrochemical behavior of titanium depend on the composition of the solution. Anodic polarization dependences obtained in solutions with different ratios of ethylene glycol:water allow us to draw the following conclusions: 1) the curve obtained in a solution with a ratio of  $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 50:50$  vol. % has a shape characteristic of the polarization curve of a metal prone to passivation during anodic polarization; 2) increasing the volume fraction of alcohol in the electrolyte from 50 to 70 vol. % causes a decrease in current densities in the entire range of anode potentials before the start of passivation. Obviously, in this case, ethylene glycol acts as an inhibitory additive that slows down the flow of electrochemical processes on the surface of titanium; 3) starting from the ratio  $V(C_2H_4(OH)_2):V(H_2O) = 70:50$  and further on the curves, a shift of the peak potential to the region of positive values is observed. Anodic polarization dependences of a titanium electrode in a mixed organic-aqueous electrolyte under conditions of change in the concentration of ammonium fluoride indicate that the behavior of titanium under conditions of polarization is characterized by the presence of areas corresponding to the dissolution of the metal and the formation of surface oxide films in certain areas of potentials that have defined values for each concentration salt in solution. The obtained results are of interest for the development of the technology of electrochemical formation of functional oxide coatings.*

**Key words:** oxide film, passivation, polarization dependence, anodic dissolution, activator ions, fluorides, ethylene glycol.

**Пилипенко Т.М.**

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

**Єфімова В.Г.**

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

**Санжаровська В.В.**

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

**Качоровська О.П.**

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

## **РОЗРОБКА СКЛАДУ ЗАСОБУ ПО ДОГЛЯДУ ЗА ШКІРОЮ ГОЛОВИ ТА ВОЛОССЯМ НА ОСНОВІ ПОЛІФЕНОЛЬНОЇ РЕЧОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ**

*Розробка складу засобу по догляду за шкірою голови та волоссям з антисеборейною дією – актуальна задача сьогодення.*

*Проведено огляд сучасних засобів по догляду за шкірою голови та волоссям з антисеборейним ефектом. Проаналізовано композиційні складники засобів, які характеризуються антисеборейними властивостями. Результатом дослідження є створення зразків якісного засобу по догляду за шкірою голови та волоссям на основі поліфенольної речовини рослинного походження.*

*Композиційними складниками засобу з антисеборейною дією є 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбен (ТГТС), пропіленгліколь, гліцерин, аскорбінова кислота, екстракт шавлії.*

*Як основну діючу речовину досліджено складник, що характеризується протизапальною, антимікробною дією, поліфенольну речовину рослинного походження, – 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбен. Якісне дослідження основної діючої речовини проведено методом тонкошарової хроматографії в системах розчинників: хлороформ – етилацетат – мурашина кислота, хлороформ – етанол.*

*Для створення складу рідкої форми засобу по догляду за шкірою голови та волоссям визначено розчинність поліфенольної речовини рослинного походження ТГТС. Встановлено, що додавання цього складника в рідке дисперсійне середовище можливо при розчиненні його в етанолі 96 %. Для зниження негативної дії спирту на шкіру голови до засобу введено додаткові складники, пропіленгліколь та гліцерин.*

*Методом УФ-спектрофотометрії встановлено кількісний вміст 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбену в складі досліджених зразків. Визначено, що з часом досліджень кількість основної діючої речовини ТГТС знижується. Це може свідчити про окиснення поліфенольного складника в засобі. Для його стабілізації необхідна наявність у зразках речовин-стабілізаторів. З цією метою до складу досліджених систем додано природний антиоксидант, активний відновник, аскорбінову кислоту.*

*Як складник засобу, що укріплює та покращує ріст волосся, характеризується зволожуючим ефектом, виявляє антисеборейні властивості додано екстракт шавлії.*

*Проведеними дослідженнями визначено фізико-хімічні показники зразків сумішей на основі поліфенольної речовини рослинного походження, 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбену, встановлено його вміст у зразках, а також показано стабільність.*

*За органолептичними та основними фізико-хімічними показниками, що характеризують якість та безпечність засобів, досліджені зразки по догляду за шкірою голови та волоссям з антисеборейною дією є безпечним у використанні.*

**Ключові слова:** засіб по догляду за шкірою голови та волоссям, 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбен, поліфенольна речовина рослинного походження, композиційні складники, органолептичні та фізико-хімічні показники, якість та безпечність.



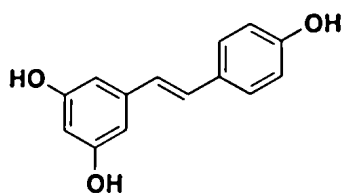
**Постановка проблеми.** Дослідження композиційних складників засобів по догляду за шкірою голови та волоссям, засобів антисеборейної дії, – актуальна задача сьогодення. Вона вимагає всебічного вивчення та пошуку нових рішень для створення якісних, ефективних продуктів відповідного призначення [1–11].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасний ринок засобів по догляду за шкірою голови та волоссям має потребу в розробці нових продуктів, які можуть задовільнити потреби споживачів. Така продукція займає понад 18 % від усіх косметичних засобів [7]. Через шкідливий вплив різних чинників на шкіру голови та волосся збільшується чисельність захворювань шкіряного покриву. Понад 30 % населення в світі мають себорею, а близько 50 % людей мали короткочасне захворювання на неї. Серед сучасних засобів по догляду за шкірою голови та волоссям, засобів з антисеборейною дією, найпоширенішими є шампуні, маски для волосся, лосьйони, засоби рідкої форми [5; 6].

Посидання активних складників у засобах по догляду за шкірою голови та волоссям з антисеборейною дією може одночасно впливати на декілька механізмів розвитку захворювання, що призводить до комплексного терапевтичного ефекту. Складниками таких засобів є селен дисульфід, літій сукцинат, кетоназол. Добре вивчені біфоназол та циклопіроксоламін (циклопірокс). У косметичних та лікувальних засобах різного призначення широко використовують ресвератрол (3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбен), що являє собою нефлавоноїдну поліфенольну фітоалексинову сполуку, яка відноситься до класу стильбеноїдів [3; 4].

**Постановка завдання.** Необхідним завданням при створенні засобів по догляду за шкірою голови та волоссям, засобів антисеборейної дії, є дослідження складників композиційних систем, вивчення фізико-хімічних характеристик, аналіз якості та безпечності їх використання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Як основну діючу речовину засобу по догляду за шкірою голови та волоссям з антисеборейним ефектом досліджено складник, що характеризується протизапальною, антимікробною дією, поліфенольну речовину рослинного походження, 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбен (ТГТС):



Якісне дослідження 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбену проведено методом тонкошарової хроматографії [2; 7] в системах розчинників: хлоро-

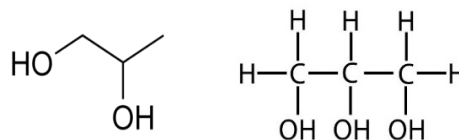
форм–етилацетат–мурашина кислота (2,5 : 1 : 0,1), хлороформ – етанол (7 : 3).

Для створення складу рідкої форми засобу по догляду за шкірою голови та волоссям вивчено розчинність поліфенольної речовини рослинного походження. Встановлено, що 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбен добре розчинний у 96 % етанолі. Останній широко застосовується, зокрема в фармацевтичній промисловості, як розчинник і консервант [6; 7]. ТГТС практично не розчиняється у воді очищеній.

Враховуючи, що концентрований спирт етиловий буде підсушувати шкіру голови та посилювати її шилушіння, небажане при себорейі, подальші дослідження розчинності поліфенольного складника засобу направлено на максимальне зниження концентрації етанолу.

Результати наступних досліджень показали, що 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбен гірше розчиняється в 70 % етанолі, є малорозчинним і практично не розчиняється в спирті 50 та 30 %. Отже, додавання поліфенольної речовини у рідке дисперсійне середовище можливо при розчиненні його в етанолі 96 %.

Для зниження негативної дії спирту етилового на шкіру голови у засобі необхідна наявність додаткових композиційних складників, якими можуть бути пропіленгліколь і гліцерин відповідно:



Ці речовини як складники косметичних та лікувальних засобів різного призначення широко застосовуються в косметичній та фармацевтичній промисловості [8; 9]. Гліцерин – речовина, що засихає, не гіркне, замерзає за дуже низьких температур і тому є складником, який перешкоджає висиханню та замерзанню засобів. Пропіленгліколь – речовина, що характеризується стабілізуючою, антиоксидантною та консервуючою дією.

Подальшими дослідженнями визначено оптимальне співвідношення додаткових речовин у засобі по догляду за шкірою голови та волоссям. Так, створеними зразками за наявності в них основної діючої речовини ТГТС у 96 % етанолі, пропіленгліколю (П) та гліцерину (Г) відповідних концентрацій є системи: 15 % П + 10 % Г (зразок І), 15 % П + 5 % Г (зразок ІІ).

Для досліджених систем визначено фізико-хімічні характеристики, густину ( $\rho$ ) та рН середовища. Густина для зразка І складає 1,007 г/см, для зразка ІІ – 1,006 г/см. рН для зразка І дорівнює 5,2 одиниць, для зразка ІІ – 5,4 одиниць (табл. 1). Величини рН досліджених зразків знаходяться в діапазоні рН шкіри голови, що в нормі складає 4,5 – 5,5 [5; 6; 10].

Таблиця 1  
Фізико-хімічні показники зразків I та II за наявності в їх складі ТГТС у 96 % етанолі

Зразки	pH, од.	$\rho$ , г/см
I (15 % П + 10 % Г)	5,4	1,007
II (15 % П + 5 % Г)	5,2	1,006

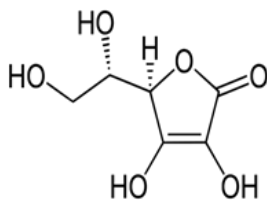
Методом УФ-спектрофотометрії ( $\lambda = 307$  нм, розчинник – 96 % етанол) [7] встановлено кількісний вміст 3, 5, 4'-тригідрокситрансстильбену. Початковий вміст речовини у складі досліджених систем дорівнює 0,3001 г. Вміст речовини у складі зразків через 30 днів: для зразка I складає 0,2300 г, для зразка II – 0,2290 г (табл. 2).

Таблиця 2  
Вміст основної діючої речовини ТГТС у складі зразків I та II

Початковий вміст ТГТС, г	Вміст ТГТС через 30 днів, г	
	Зразок I	Зразок II
0,3001	0,2300	0,2290

З часом досліджень кількість основної діючої речовини ТГТС у складі створених зразків знижується більш ніж на 23 % (табл. 2). Це може свідчити про те, що в процесі зберігання композиційних систем відбувається окиснення поліфенольного складника. З метою його стабілізації у складі засобу необхідна наявність речовин-стабілізаторів [6].

До складу досліджених зразків було додано природний антиоксидант, активний відновник [6], аскорбінову кислоту:

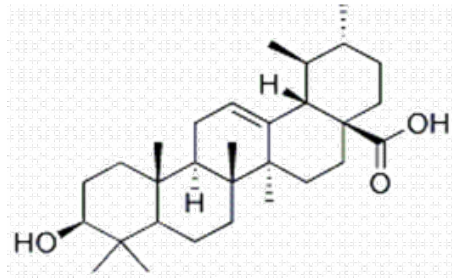


Впродовж 30 днів досліджень композиційні системи зразків за наявності речовини-стабілізатора – прозорі, безкольорові рідини, вміст основної діючої речовини ТГТС у них постійний.

Аскорбінова кислота вступає в окисно-відновні реакції з окисниками різної природи, де поводить себе як донор гідрогену, переходячи в свою окиснену форму, дегідроаскорбінову кислоту. За рахунок наявності енольних гідроокислів аскорбінова кислота виявляє кислі властивості. Це також важливо для стабілізації поліфенольного складника в зразках, зважаючи на те, що у кислому середовищі феноли стабільні [4].

Як складник засобу, що укріплює та покращує ріст волосся, характеризується зволожуючим

ефектом, виявляє також антисеборейні властивості, до композиції досліджених зразків додано екстракт шавлії [5]:



У рідкому екстракті листя шавлії лікарської ідентифіковано 10 вільних та 11 зв'язаних амінокислот, з яких домінуючими є тирозин, серин, глутамінова та аспарагінова кислоти. Вміст вільних амінокислот складає 0,48 %, а вміст зв'язаних – 0,63 %. У рідкому екстракті виявлено 12 речовин фенольної природи, з них 3 гідроксикоричні кислоти – кавова, розмаринова та хлорогенова; 6 флавоноїдів – апігенін, лютеолін, кверцетин, 3-метоксилутолін, лютеолін-7-О-глюкозид і кверцетин-3-О-арабінозид.

Встановлено, що наявність доданого екстракту, рідини жовтого кольору (безспиртової), не знижує кількість основної діючої речовини ТГТС у досліджених зразках. Композиційні системи набувають жовтуватої барви й упродовж наступних 30 днів досліджень зберігають її.

Аналіз якості та безпечності зразків на основі діючої речовини ТГТС проводили за органолептичними та основними нормованими фізико-хімічними показниками, об'ємним вмістом етилового спирту та водневим показником pH [2; 10; 11].

За органолептичними дослідженнями зразки засобу по догляду за шкірою голови та волоссям – однорідні прозорі рідини жовтуватого кольору зі специфічним запахом. Об'ємний вміст спирту етилового (допоміжної речовини) та pH середовища – 96 % та 5,2 – 5,4 одиниць відповідно.

**Висновки.** Розроблено зразки засобу рідкої форми для зовнішнього застосування, догляду за шкірою голови та волоссям, на основі поліфенольної речовини рослинного походження, 3,5,4'-тригідрокситрансстильбену, що характеризується антисеборейною дією.

Визначено фізико-хімічні показники зразків засобу по догляду за шкірою голови та волоссям, вміст основної діючої речовини в них.

Додаванням аскорбінової кислоти, складника-стабілізатора засобу, підтверджено його стабільність.

Показано якість та безпечність досліджених композиційних систем з антисеборейним ефектом.

## Список літератури:

1. ДСТУ 5009:2008. Вироби парфумерно-косметичні. Правила приймання, відбирання проб, методи органолептичних випробувань. Київ, 2009. Держспоживстандарт України. 4 с.
2. ДСТУ 4315:2004. Засоби косметичні для очищення шкіри та волосся. Загальні технічні умови. Київ, 2005. Держспоживстандарт України. 7 с.
3. Kamamoto Cristhine de Souza Leão, Sanudo Adriana, Hassun Karime M. Bagatin Ediléia. Low-dose oral isotretinoin for moderate to severe seborrhea and seborrheic dermatitis: a randomized comparative trial. *International Journal of Dermatology*. 2017. С. 80–85.
4. Truong V.L., Jun M., Jeong W.S. Role of resveratrolin regulation of cellular defense systems against oxidative stress. *Biofactors*. 2018. С. 36–49.
5. Пешук Л.В., Бавіка Л.І., Демідов І.М. Технологія парфумерно-косметичних продуктів. К.: Центр учбової літератури, 2007. 376 с.
6. Башура О. Г., Половко Н.П., ... Ковальова Т.М. Технологія косметичних засобів: Навчальний посібник для студ. фармацев. спец. вищих навчальних закладів. Вінниця: Нова книга, 2007. 360 с.
7. Федоровська М.І. Технологія лікарських косметичних засобів: методичні рекомендації до лабораторних занять. Луцьк: П «Зоря-плюс» ВОО ВОІ СОІУ, 2022. 39 с.
8. Пилипенко Т.М., Невпруга, П.Ю. Основні діючі речовини та застосування екстракту зеленої кави. *Хімічні проблеми сьогодення: ХХ Міжнародна (ХІІ Українська) наукова конференція студентів, аспірантів і молодих учених (Вінниця, 19–21 березня 2019р.)*. Вінниця, 2019. С. 37.
9. Мансурова А.В., Пилипенко Т.М. Зволожувачі у складі композиційних систем. *Динаміка, рух та розвиток сучасної науки: матеріали міжнародної студентської наукової конференції (Луцьк, 05 березня 2021р.)*. Луцьк, 2021. С. 46–47.
10. Пилипенко Т.М., Чигиринець О.Е., Воробйова В.І., Єфімова В.Г. Дослідження фізико-хімічних показників якості піномийних косметичних засобів. *Технічні науки та технології*. 2016. № 1 (3). С. 222–228.
11. Пилипенко Т.М., Рябчун Ю.В., Єфімова В.Г. Дослідження якості косметичних кремів для рук. *Технічні науки та технології*. 2017. № 4 (10). С. 210–216.

**Pylypenko T.M., Yefimova V.G., Sanzharovska V.V., Kachorovska O.P.**

#### **COMPOSITION DEVELOPMENT OF THE MEANS FOR SCALP AND HAIR CARE ON THE BASIS OF A PLANT ORIGIN POLYPHENOLIC SUBSTANCE**

*Developing the composition of a scalp and hair care product with an anti-seborrheic effect is an urgent task today.*

*A review of modern scalp and hair care products with anti-seborrheic effect was conducted, and the compositional components of the products, which are characterized by anti-seborrheic properties, were analyzed. The result of the research is the creation of samples of a high-quality scalp and hair care product based on polyphenolic substances of plant origin.*

*The compositional components of the antiseborrheic agent are 3, 5, 4'-trihydroxytransstilbene (THTS), propylene glycol, glycerin, ascorbic acid, sage extract.*

*As the main active substance, a component characterized by anti-inflammatory, antimicrobial action, a polyphenolic substance of plant origin, 3, 5, 4'-trihydroxytransstilbene, was investigated. A qualitative study of the main active substance was carried out by the method of thin-layer chromatography in solvent systems: chloroform - ethyl acetate - formic acid, chloroform - ethanol.*

*To create the composition of the liquid form of the scalp and hair care product, the solubility of the plant-derived polyphenolic substance TGTS was determined. It was established that the addition of this component to the liquid dispersion medium is possible when it is dissolved in 96 % ethanol. To reduce the negative effect of alcohol on the scalp, additional components, propylene glycol and glycerin, are added to the product.*

*The quantitative content of 3, 5, 4'-trihydroxytransstilbene in the studied samples was determined by UV spectrophotometry. It was determined that the amount of the main active substance of TGTS decreases over time. This may indicate oxidation of the polyphenol component in the product. For its stabilization, the presence of stabilizer substances in the samples is necessary. For this purpose, a natural antioxidant, an active reducing agent, ascorbic acid was added to the studied systems.*

*Sage extract is added as a component of the product that strengthens and improves hair growth, is characterized by a moisturizing effect, and exhibits anti-seborrheic properties.*

*The conducted studies determined the physico-chemical parameters of the samples of mixtures based on the polyphenolic substance of plant origin, 3, 5, 4'-trihydroxytransstilbene, and determined its content in the samples and its stability.*

*According to the organoleptic and basic physico-chemical parameters characterizing the quality and safety of the products, the samples of the scalp and hair care product with anti-seborrheic effect are safe to use.*

**Key words:** *scalp and hair care product, 3, 5, 4'-trihydroxytransstilbene, polyphenolic substance of plant origin, compositional components, organoleptic and physicochemical indicators, quality and safety.*

**Спасьонова Л.М.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СТВОРЕННЯ ЯКІСНОЇ КЕРАМІКИ З МІСЦЕВОЇ ЛЕГКОПЛАВКОЇ СИРОВИНИ З ВИСОКОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДО СУШІННЯ

*Стаття присвячена дослідженню фізико-механічних властивостей виробів будівельної кераміки, виготовленої на основі легкоплавкої глини Київської області з додаванням домішок кремнеземистих порід (опок, трепелів, діатомітів), запаси яких в Україні досить значні. При виборі глинистої сировини для конкретної керамічної технології необхідно керуватися комплексною оцінкою фізико-хімічних властивостей глинистої породи – гранулометричного та речовинного складів, включаючи хімічний, мінералогічний склад глинистої та складових домішок, наявність аморфізованого матеріалу, стан упорядкованості структури глиноутворюючих мінералів, що дозволяє визначитися з шляхами регулювання основних технологічних властивостей глинистої породи з метою отримання регульованих властивостей. Застосування у складі керамічних мас на основі легкоплавких малопластичних глин кремнеземистих матеріалів в якості добавки для поліпшення фізико-механічних характеристик готової продукції показало свою ефективність. Додавання легкоплавких оксидів, які входять до складу опок, трепелів або діатомітів, сприяють утворенню легкоплавкої евтектики, знижуючи вогнетривкість аморфного кремнезему та позитивно впливають на процес спікання, утворюючи склофазу в керамічній матриці. При додаванні домішки опоковмісної породи також підвищувалася міцність готових виробів на стиск, що забезпечує бездефектне транспортування виробів на інші технологічні операції.*

*Проведені дослідження свідчать, що місцева мінеральна сировина з відпрацюванням технологічних режимів може бути використана для виробництва будівельної кераміки, яка так необхідна буде після закінчення воєнного стану і для відновлення України.*

**Ключові слова:** керамічні будівельні матеріали, легкоплавка глиниста сировина, кремнеземисті матеріали, опока, сушіння, механічна міцність.

**Постановка проблеми.** Базовою галуззю будівельної промисловості є сучасне виробництво будівельних матеріалів. У зв'язку з високою енергоємністю вона є однією з найбільш постраждалої під час воєнного стану. В даний час постає питання про гостру нестачу сучасних будівельних та оздоблювальних матеріалів та виробів. В Україні є всі можливості розвитку виробництва будівельних матеріалів. Зростання обсягів вітчизняного виробництва будівельних матеріалів та розробка нових видів кераміки є сьогодні актуальним і одним із пріоритетних напрямів виведення будівництва із кризової ситуації. Однак виснаження запасів високоякісних глин призводить до необхідності ширшого використання місцевої сировини для кераміки будівельного призначення.

Досвід роботи західних компаній із виробництва виробів будівельної кераміки показує, що для реалізації потенціалу місцевої мінеральної сировини та впливу на її властивості різних добавок необхідне вивчення фізико-хімічних процесів, що відбуваються при сушінні та випаленні глин та їх сумішей [1, 2]. Застосування природної мінераль-

ної сировини, різноманітних промислових відходів у виробництві будівельних матеріалів є одним з основних напрямків зниження матеріаломісткості та енергоємності цього багатотоннажного виробництва. Відомі численні способи модифікації керамічної сировини: додавання у керамічну масу техногенних відходів, хімічних реагентів та інших добавок, при введенні яких обов'язковою умовою є нейтралізація шкідливих для здоров'я людини елементів. Добре відомо, що модифікація малоцінних полімінеральних глин дорогими каоліновими глинами покращує технологічні та експлуатаційні властивості виробів, проте застосування їх обмежене високою вартістю і значними транспортними витратами [3].

Наразі питання ресурсо- та енергозбереження в керамічному виробництві з урахуванням його матеріало- та енергоємності є актуальними для поліпшення техніко-економічних показників роботи підприємств. Поступове скорочення запасів сировини для керамічної промисловості призводить до пошуку рішень, які використовують при виробництві будівельної матеріалів. Тому

актуальним є вивчення властивостей керамічних мас на основі місцевої мінеральної сировини шляхом модифікації її домішками кремнеземистих порід (опок, трепелів, діатомітів), запаси яких в Україні досить значні.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Різноманітне застосування кераміки з кожним роком вимагає розробки все нових типів керамічних мас і більш сучасних енергозберігаючих і ресурсозберігаючих способів їх виробництва. Для виготовлення будівельної кераміки необхідно реалізувати потенціал місцевої мінеральної сировини. Тому вивчення можливості використання місцевої легкоплавкої глини Київського регіону для виготовлення керамічних мас залишається актуальним і сьогодні.

Для ефективного застосування місцевої легкоплавкої сировини виникає потреба в розробці шляхів та способів покращення якості будівельної кераміки, виготовленої на її основі. Якість готових виробів в значній мірі залежить від процесів, які відбуваються при сушінні, що складає 10–12% від загальної собівартості готових виробів. Тому актуальним є питання дослідження властивостей мас на основі місцевої легкоплавкої глини з високою чутливістю до сушіння, та в якості домішки застосування кремнеземистої мінеральної породи.

Кремнеземисті мінеральні породи мають осадкове та вулканічно-осадкове походження. В загальному вигляді осадкові мікропористі породи складаються з опалу (діатомітів, спонголітів тощо), опоки та трепелу. Ці мінерали складаються з кремнезему від 60 до 90% та глинистого мінералу від 10 до 40%. Зустрічаються такі різновиди, в яких вміст глинистого мінералу збільшується до 30–60%.

Опоки являють собою легкі мікропористі породи, складені переважно найдрібнішими частинками опалового кремнезему. У різній кількості в опоках присутні глинистий матеріал, у вигляді гідрослюду та монтморилоніту, тонкодисперсний кальцит, цеоліти, теригенні домішки. Колір від жовтого до темно-сірого. Середня густина 1100–1600 кг/м<sup>3</sup>, а пористість сягає 50%. Хімічний та мінералогічний склад опок дуже різноманітний. За хімічним складом вони близькі до суглинків, льосів, але за мінералогічним складом вони мають значні відмінності. Наприклад, для суглинків основна частина кремнезему представлена кварцем, а для опок – опалом. Родовища опок відрізняються великою потужністю та розповсюджені в багатьох областях України. Для зменшення чутливості до сушіння керамічного

матеріалу з місцевої легкоплавкої сировини застосовували додавання домішки опоки.

Значна частина тріщин, деформацій виникають при сушінні виробів. Дефекти, які утворюються при термообробці, виникають в період усадки, коли в одній частині виробу утворюється тверда структура, а в іншій частині ще продовжується зміна розмірів. Як наслідок виникають напруження, короблення, тріщини. Сушильні властивості відображають зміни, які відбуваються в керамічній масі при її сушінні. До них належить повітряна усадка, чутливість до сушіння та водопоглинання керамічної маси.

Важливою особливістю зволжених глин, що перебувають у стані пластичного тіста, є усадкові процеси при видаленні вологи. Значення лінійної усадки при сушінні становить, зазвичай, від 6 до 10%, що відповідає зменшенню об'єму на 17–26%. Об'єм тіла зменшується при зближенні глинистих частинок по мірі видалення розташованих між ними водних прошарків, а також за рахунок зниження власного об'єму частинок тих глинистих мінералів (групи монтморилоніту), які можуть містити міжплощинну воду. Однак усадкові явища супроводжують видалення далеко не всього об'єму води, що випаровується, так як частина її видалається з капілярів і проміжків, які не можуть бути заповнені контактуючими твердими частинками.

Спіснення глин непластичними матеріалами призводить до зменшення робочої вологості та зниження повітряної усадки. Особливо падає вміст усадкової води, тоді як частка води пор збільшується. У процесі сушіння керамічного напівфабрикату вода з нього видалається переважно шляхом випаровування із зовнішньої поверхні, до якої вона підводиться з внутрішніх шарів в результаті перепаду вологості і явища вологопровідності. В основному періоді сушіння, що починається після прогріву маси до заданої температури, волога видалається з постійною швидкістю. Так як видалення вологи супроводжується зменшенням об'єму, то зовнішні шари повинні в цей період давати усадку більше, ніж внутрішні. Однак внутрішні шари перешкоджають усадці зовнішніх. В результаті створюється складний напружений стан, що характеризується розтягуванням зовнішніх та стисненням внутрішніх шарів. Більша частина тріщин, деформація виробів виникають при сушінні керамічної маси [4–7].

**Мета дослідження** – одержання керамічного матеріалу на основі місцевої легкоплавкої глини з використанням як недефіцитної природної добавки

опоки, яка сприятиме зменшенню повітряної усадки та чутливості до сушіння керамічної маси.

**Виклад основного матеріалу.** Предметом дослідження є комплексне вивчення легкоплавкої глини Київської області, недоліком якої є висока чутливість до сушіння. Додавання опоки до складу керамічної маси на основі легкоплавкої глини дозволить оптимізувати її сушильні властивості, сприяючи формуванню структури з покращеними експлуатаційними властивостями будівельної кераміки.

Для вирішення поставлених завдань були проведені дослідження легкоплавкої глини Київської області та розробки складів мас, а також основних характеристик виготовленої продукції. Всі випробування проводили з застосуванням сучасних фізико-хімічних методів – рентгенофазового, диференційно-термічного та хімічного. При розробці керамічних мас для виготовлення будівельної кераміки необхідно враховувати чутливість їх до сушіння, зміну лінійних розмірів зразків під час сушіння, межу міцності на стиск та водопоглинання.

За результатами хімічного аналізу місцевої глини Київської області вирізняється невисоким вмістом  $\text{SiO}_2$ , – 62,95%; кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , знаходиться в межах 11,5–12,1%. За вмістом  $\text{Al}_2\text{O}_3$  згідно ДСТУ Б В.2.7-60-97 глиниста сировина відповідає групі кислих глин і може використовуватися для виробництва керамічної будівельної цегли.

За кількістю  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{TiO}_2$  глина відноситься до сировини з високим вмістом забарвлюючих оксидів, 3,1% та 0,47% відповідно. Досліджувана глина має високий вміст карбонатів – більше 5%, сума лужних оксидів перевищує 2%. Кількість вільного кварцу складає 35%. Сума водорозчинних солей у вихідній сировині складала 0,25 мг-екв/100 г глини, що відносить її до групи з низьким їх вмістом. Вміст інших оксидів відповідав складу, %:  $\text{CaO}$  – 10,96;  $\text{MgO}$  – 1,45;  $\text{SO}_3$  – 1,45;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,27;  $\text{K}_2\text{O}$  – 1,36. Втрати при прожарюванні (в.п.п.) становив 10,52%.

Найважливішими властивостями глин є пластичність, відношення до сушіння (повітряна усадка) і до високої температури. Ступінь пластичності залежить від мінералогічного і гранулометричного складів, форми і характеру поверхні зерен, а також від вмісту в них розчинних солей, органічних домішок і кількості зв'язаної води. До складу глин входять різні за величиною частки: від 5 до 0,14 мм – це піщані фракції; від 0,14 до 0,005 мм – пілеподібні фракції і менше 0,005 мм – глинисті фракції. Великий вплив на зв'язуючі властивості глин і їх усадку здійснюють фракції розміром менше 0,001 мм. Чим більше таких

часток міститься у складі глин, тим вище пластичність. За рахунок зміни вмісту піску гранулометричний склад зразків часто змінюється навіть в межах одного родовища. Досліджувана нами глина характеризується високим вмістом мілкодисперсних часток фракції менше 0,001 мм – 47,4%, при цьому кількість часток фракції 0,06 мм і більше складає всього 1,6%. Кількість фракції 0,06–0,01 мм складає 22,14%; 0,01–0,005 мм – 10,1%; 0,005–0,001 мм – 19%. Таким чином глина, що була досліджена, відноситься до дисперсної групи з середнім вмістом крупнозернистих включень. За пластичністю глина належить до помірно-пластичної. Встановлено також присутність карбонатних включень розміром 0,5–10 мм, залізистих – 0,5–5 мм та зерен кварцу розміром 0,5–3 мм. Загальний залишок на ситі 0,5 мм становив 0,7%, у тому числі карбонатних – 0,52%.

За результатами диференціально-термічного аналізу на кривій нагрівання досліджуваної сировини спостерігались термічні ефекти, що відносяться до процесів виділення адсорбційної води (150°C) і міжпакетної води (220°C); видалення структурної води з глинистого мінералу майже до повного руйнування решітки (560°C); поліморфного перетворення кварцу (580°C); втрати залишків гідроксильної води (700°C) і дисоціації карбонатів кальцію (820°C).

Рентгенофазовий аналіз полімінеральної глини (рис. 1) проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2,0 (Burevisnuk) з двома щілинами Соллера, з відфільтрованим  $\text{CuK}\alpha$  – випромінюванням з нікелевим фільтром. Дифракційна картина легкоплавкої глини, форма та інтенсивність піків свідчать про достатню кристалічність фаз, які містяться у матеріалі. Однак незначне гало при 20° можна пояснити тим, що разом з кристалічною речовиною в сировині присутня і дисперсна, аморфізована складова. В матеріалі присутній  $\text{SiO}_2$ , що представлений кварцем, за інтенсивністю піків можна стверджувати, що дана форма кварцу є основною фазою у матеріалі. Також присутній кварц і з дещо меншими параметрами елементарної кристалічної ґратки. У складі легкоплавкої глини присутній також  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що існує у формі корунду. Окрім оксидів кремнію та алюмінію присутні достатньо інтенсивні піки  $\text{CaO}$ . Таким чином, можна заключити, що за наявності кристалічних речовин, легкоплавка глина має чотири основні фази [8].

Мінералогічний склад опоки представлений опалом (50–60%), глинистими мінералами (25–35%), незначною кількістю терригенних домішок. Пластичність подрібнених опок становить 10–12 одиниць.

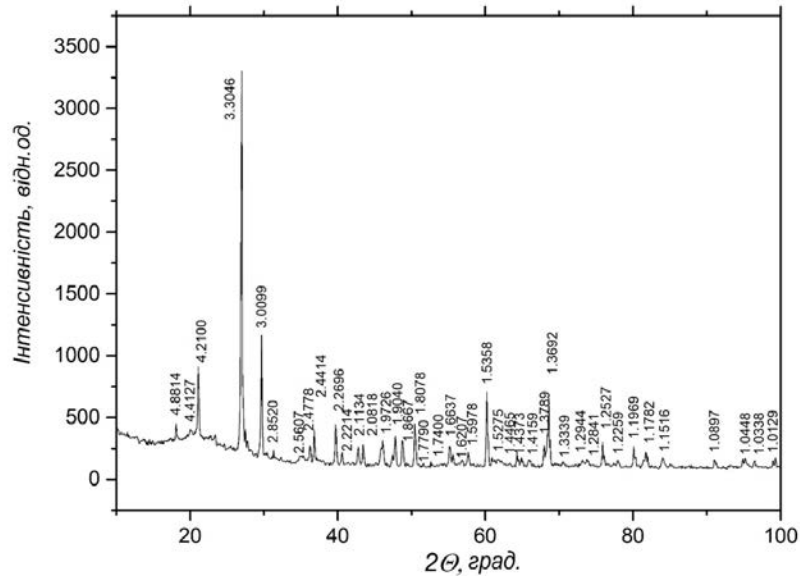


Рис. 1. Дифрактограма зразку легкоплавкої глини Київської області

При проведенні лабораторно-технологічних досліджень підготовку сировинної маси та формування зразків проводили користуючись технологією максимально наближеною до процесу виготовлення керамічних виробів будівельного призначення. У роботі використовували пластичний спосіб підготовки сировинної суміші та формування зразків. Глину спочатку подрібнювали, а потім мололи у вальцях тонкого помелу і бігунах. Опоку спочатку сушили, а потім подрібнювали в кульових млинах до проходження через сито 0,63 мм. Потім у кількості 10, 15 та 20% додавали до вихідної глини і ретельно усереднювалися у сухому вигляді. Після цього вихідну масу зволожували до необхідної формувальної вологості та ретельно переробляли.

Формувальна маса вилежувалася в умовах, що виключають підсушування, протягом 24 годин. Після вилежування формували зразки розміром 50×50×50 мм і балок розміром 60×15×10 мм методом пластичного пресування з вологістю 18–22%. Вилежування маси необхідно проводити для забезпечення протікання масообмінних процесів між глиною та опокою в повному обсязі. Відформовані зразки висушували до вологості 3–6%. Сушіння проводили в сушильній шафі при 105°C до постійної маси. Після закінчення сушіння зразки оглядалися, фіксувалися всі зміни зовнішнього вигляду, визначалися величини повітряної лінійної та об'ємної усадок зразків. Випал проводили в електричній печі при 1000°C.

З метою вивчення впливу добавки опоки на технологічні властивості керамічних мас на основі

легкоплавкої сировини були досліджені шихти для виробництва будівельної кераміки наступних складів зі співвідношенням глини і опоки: № 1 – 100:1; № 2 – 90:10; № 3 – 85:15 та № 4 – 80:20.

Особливістю будови кремнеземистих мінеральних опок є наявність активної аморфної кремнекислоти, а також тонкодисперсна структура, легкість, мала теплопровідність і екологічність у використанні. Це тонкозернисті матеріали, які мають досить високу пористість (до 55%), за походженням опоки – полімінеральні, у гранулометричному відношенні порівняно однорідні. У опоках кремнезем існує у вигляді аморфного силікагелю, що сприяє поліпшенню структури глини, і робить її монолітною, підвищуючи механічну міцність.

В результаті проведених досліджень встановлено, що добавка опоки в кількості 10–20% до легкоплавкої полімінеральної глини сприяє зниженню чутливості її до сушіння. Для легкоплавкої глини вона становить 64 с, а при додаванні опоки збільшується до 69 с (зразок № 2), 78 с (зразок № 3) та 85 с (зразок № 4). Також механічна міцність на стиск в сухому стані, яка є важливим фізико-механічним показником для подальшого процесу виробництва будівельної кераміки підвищилась.

Результати проведених досліджень (табл. 1) показали, що збільшення кількості добавки опоки від 10 до 20% мас. до легкоплавкої глини сприяло зміцненню напівфабрикату в сухому стані до 8,8 МПа. На формувальну вологість та пластичність добавка опоки вплинула незначно.

Технологічні властивості керамічної маси після сушіння

Технологічні показники	Легкоплавка глина	Вміст домішки опоки, %		
		10	15	20
Формувальна вологість, %	22,5	21,7	21,6	21,1
Число пластичності	14,5	13,8	13,1	12,9
Повітряна усадка, %	8,4	7,4	7,2	6,8
Міцність на стиск в сухому стані, МПа	8,6	8,4	8,5	8,8

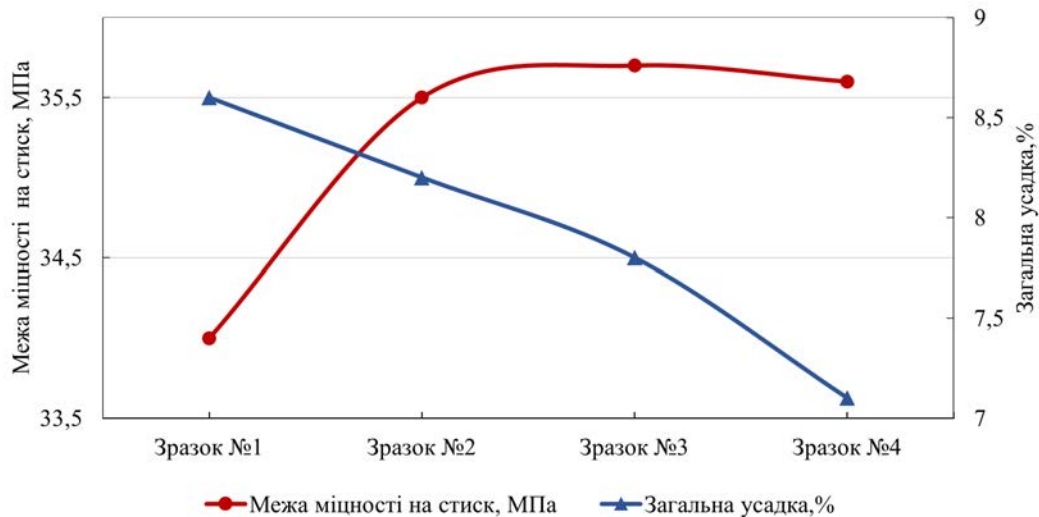


Рис. 2. Технологічні властивості керамічної маси після випалу

Одним з важливих показників сушильних властивостей глинистої сировини є повітряна усадка, яка свідчить про зменшення розмірів виробів при їх сушінні. Додавання домішки опоки сприяло зменшенню повітряної усадки, що позитивно впливає на стабільність зовнішніх розмірів виробів. Для керамічної маси з глини вона складала 8,4%, а для мас зі співвідношенням зразка 90:10 – 7,4; для зразка 85:15 – 7,2 і для зразка 80:20 – 6,8%.

Серед фізико-механічних властивостей механічна міцність є одним з основних критеріїв придатності сировинних матеріалів для виробництва будівельної кераміки. Проведені дослідження показали, що при збільшенні кількості добавки опоки від 10 до 20% до легкоплавкої глини, механічна міцність керамічних зразків при стискуванні збільшується. Також проводили візуальний огляд досліджуваних зразків на наявність тріщини, викривлень, оскільки якість випалення впливає не лише на механічну міцність, а й на водопоглинання і морозостійкість кераміки. Результати визначення межі міцності на стиск та загальної усадки досліджуваних мас після випалення представлено на рис. 2.

Водопоглинання зразків після випалення значно не змінилося. Для зразку з глинистої сировини (№ 1) воно складало 14,3%, для зразків № 2, № 3, № 4 – 15,3 15,6 15,7 відповідно при збільшенні міцності виробів.

Проведені дослідження показали, що через обмеження високоякісної глинистої сировини в багатьох регіонах є можливість застосування місцевих легкоплавких глин для виробництва будівельної кераміки. Склад легкоплавких глин потребує застосування домішок, які сприятимуть поліпшенню технологічних властивостей керамічних мас на їх основі. Однією з таких можуть бути опоковмісні мінеральні породи. Використання цих матеріалів в якості сировинної домішки сприятиме розширенню застосування у виробництві місцевої сировини та позитивно позначиться на техніко-економічних показниках функціонування підприємств з виробництва будівельної кераміки.

Місцева мінеральна сировина, з відпрацюванням технологічних режимів, може бути використана для виробництва будівельної кераміки, яка так необхідна буде після закінчення воєнного стану і для відновлення України.

Дослідження проводилось в рамках ініціативної теми «Керамічні матеріали на основі мінеральної сировини Київського регіону» (Державна реєстрація 0122U000523, дата реєстрації: 2022-01-23).



**Висновки.** Проведені систематичні дослідження показали, що добавку опоки до легкоплавкої глинистої сировини можливо використовувати для виробництва будівельної кераміки (цегли). Незначне зниження формувальної вологості і пластичності не вплинуло на формувальні властивості керамічної маси. Введення опоковмісної породи до 20 мас.% в якості домішки до полімінеральної глини сприяло зниженню чутливості її до сушіння у 1,3 рази без погіршення зв'язності, завдяки чому тріщиностійкість керамічної маси підвищилась.

Встановлено, що при додаванні опоки також спостерігалось підвищення міцності на стиск зразків після сушіння до 8,8 МПа. Це забезпечує можливість бездефектної автоматичної посадки і транспортування висушеного напівфабрикату, а після випалення отримати кераміку з межею міцності на стиск до 35,7 МПа. Поліпшення

сушильних властивостей легкоплавкої місцевої сировини досягається переводом частини вільної води глини у зв'язаний стан шляхом переносу її у поровий простір опокомісної породи.

Проведені дослідження свідчать, що місцева мінеральна сировина з відпрацюванням технологічних режимів може бути використана для виробництва будівельної кераміки, яка так необхідна буде після закінчення воєнного стану і для відновлення України.

Подяка. Автор висловлює вдячність співробітникам відділу «Функціональної кераміки на основі рідкісних земель» Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України і особисто завідувачу відділу, доктору технічних наук, старшому досліднику Оксані Анатоліївні Корнієнко за виконані рентгенівські дослідження глинистих мінералів.

#### Список літератури:

1. Manoj Dole. Ceramic Technology Diploma&Engineering MCQ. Objective question answers. India. 2021. 107 p.
2. Zaccaron, A., Souza, de V., Nandia Marcelo Dal Bó, Arcaro, S., Bernardinac A. M. The behavior of different clays subjected to a fast-drying cycle for traditional ceramic manufacturing. Journal of King Saud University - Engineering Sciences. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.05.003>
3. Manuahan, E. Analysis and Optimization of Drying of Green Bricks in a Tunnel Dryer. Drying Technology. 2009. 27(5), 707-713. doi: <https://doi.org/10.1080/07373930902827692>
4. Terzića, A., Pezo, L., Mitić, V. V. Optimization of drying through analytical modeling: clays as bonding agents in refractory materials. Ceramics International. 2016. 42(5), 6301-6311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.018>.
5. Aungatichart, P., Wada, S. Correlation between Bigot and Ratzenberger drying sensitivity indices of red clay from Ratchaburi province (Thailand). Applied Clay Science. 2009. 43(2), 182-185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.08.001>
6. Moritz, T., Werner, G. & Tomandl, G. Drying of Ceramic Layers with a Graded Pore Structure. Journal of Porous Materials 6, 111–117 (1999). <https://doi.org/10.1023/A:1009675204731>
7. Jamal Eldin F.M.Ibrahim, Tihtih, M., Gömze, L. A., Environmentally-friendly ceramic bricks made from zeolite-poor rock and sawdust. Construction and Building Materials, 297, 123715. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123715>
8. M. Wojdyr, J. Appl. Cryst., 2010. Vol. 43, №5-1.- P. 1126-1128 <https://doi.org/10.1107/S0021889810030499>

#### Spasonova L.M. CREATION OF QUALITY CERAMICS FROM LOCAL MELTING RAW MATERIALS WITH HIGH SENSITIVITY TO DRYING

*The article is dedicated to the study of the physical and mechanical properties of construction ceramics, made on the basis of low-melting clay of the Kyiv region with the addition of siliceous rock admixtures (gaize, cherts, diatomites), the reserves of which are quite significant in Ukraine. In case of choosing a clay raw material for a specific ceramic technology, it is necessary to be guided by a comprehensive assessment of the physical and chemical properties of the clay rock – granulometric and material composition, including the chemical and mineralogical composition of the clay and component impurities, the presence of amorphized material, the state of orderliness of the structure of clay-forming minerals, which allows determining the ways of regulation of clay rock main technological properties in order to obtain adjustable properties. The use of siliceous materials as an additive to improve the physical and mechanical characteristics of finished products as part of ceramic masses based on low-melting, low-plastic clays has shown its effectiveness. Additions of low-melting oxides, which are included in the composition of opocs, trepels or diatomites, contribute to the formation of low-melting eutectics, reducing the refractoriness of amorphous silica and have a positive effect on the sintering process, forming a glass phase in the ceramic matrix. Adding admixture of gaize-containing rock also increased the compressive strength of finished products, which ensures defect-free transportation of products to other technological operations.*

*The conducted studies show that local mineral raw materials, with the development of technological regimes, can be used for the production of building ceramics, which will be so necessary after the end of martial law and for the restoration of Ukraine.*

**Key words:** ceramic building materials, low-melting clay raw materials, siliceous materials, gaize, drying, mechanical strength.

**Фроленкова С.В.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ФОРМУВАННЯ КОНВЕРСІЙНИХ МОЛІБДАТНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ З МЕТОЮ ЇЇ ЗАХИСТУ ВІД АТМОСФЕРНОЇ КОРОЗІЇ.

### Ч. 1. УТВОРЕННЯ НА СТАЛІ ПЛІВОК З ОКСИДУ МОЛІБДЕНУ (IV) ШЛЯХОМ ВІДНОВЛЕННЯ МОЛІБДАТІВ

У статті проаналізовано сучасний стан питання захисту маловуглецевих сталей шляхом нанесення конверсійних покриттів від атмосферної корозії. Окрема увага автором приділена розгляду молибденових захисних шарів, які набирають все більшої популярності, як сучасна екологічно безпечна альтернатива хромвісним плівкам.

Автором запропоновано хлорид – ацетатні розчини для нанесення молибдатних конверсійних захисних покриттів, доцільність кожного з компонентів якого обґрунтовано. Іони  $\text{NH}_4^+$ , введені в об'єм у складі молибдату амонію, виступають в якості донорів протонів і суттєво прискорюють реакції відновлення молибдатів до сполук молибдену (IV). Автором доведена ефективність введення в розчин ацетату цинку для зменшення швидкості реакції розчинення металу основи. Важливою характеристикою запропонованого розчину для нанесення конверсійних молибдатних покриттів також є те, що він експлуатується в умовах кімнатної температури, що суттєво спрощує технологію його нанесення, виключаючи фактор необхідності нагрівального обладнання та спеціальної вентиляції для видалення випаровувань.

У роботі для формування молибдатних конверсійних покриттів використовувались розчини з рН 5,3 та 3,8. При цьому встановлено, що підкислення робочого розчину соляною кислотою до рН 3,8, сприяє прискореному формуванню темних покриттів на сталі: зразки починають темніти через 1–2 хвилини після занурення, у той час як в розчинах з рН 5,3 зміна кольору починалась через 8–10 хвилин витримання в об'ємі. Це узгоджується з тим фактом, що при підкисленні розчину процес відновлення молибдату відбувається швидше. Автором встановлено та показано, що катодна поляризація сталевих поверхні також прискорює формування щільних оксидно-молибденових шарів. Їх захисна дія підтверджена і на анодних кривих, які демонструють зменшення струмів розчинення сталевих поверхні з нанесеним конверсійним покриттям у 3,5 рази в порівнянні з необробленою. Колір таких захисних шарів, в залежності від часу обробки, змінюється від райдужного сіро-зеленого відтінку до райдужного фіолетово-синього.

**Ключові слова:** конверсійні покриття, оксидно-молибденові шари, катодна та анодна поляризація, атмосферна корозія.

**Постановка проблеми.** Сьогодні основними вимогами для різних металевих та неметалевих покриттів є не тільки високі захисні властивості та тривалий термін слугування, а й екологічна безпека розчинів з яких їх наносять. Зокрема, це стосується оксидних покриттів, які належать до класу конверсійних – неметалевих неорганічних шарів, які формуються в результаті взаємодії металевих поверхні з робочим конвертуючим розчином.

На поверхні металу, в залежності від умов проведення процесу, отримують оксидні або сольові плівки, які характеризуються різною товщиною та структурою, кристалічною або аморфною, є суцільними або пористими, безбарвними або кольоровими. Властивості сформованих покриттів визначають різні сфери їх застосування: захист

від корозійного руйнування, підвищення твердості та зносостійкості, відзеркалюючої здібності та ізоляційних властивостей. Дуже часто оксидні покриття є основою для подальшого нанесення лакофарбних покриттів.

Більшість конверсійних покриттів (КП) наносять з гарячих концентрованих розчинів (фосфатування, оксидування) шляхом занурення впродовж тривалого часу. Одним з видів конверсійних покриттів, які отримують при низьких температурах є хроматні, які використовують для обробки таких металів як цинк, кадмій, мідь, алюміній, магній, титан, срібло, а також сплави цих металів. Але висока токсичність сполук хрому вимагає їх заміни на більш екологічно безпечні реагенти [1, с. 65–71]. Молибдати є неорганічними інгібіто-

рами, віднесеними до класу безпечних, на основі яких розроблено склади розчинів для формування конверсійних покриттів з метою захисту від корозії цинку і алюміній-магнієвих сплавів. Такі КП є плівками з продуктів неповного відновлення молібдату, зокрема діоксиду молібдену, який саме і надає плівці характерного чорного забарвлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Молібдатні конверсійні покриття, як правило, застосовуються для обробки цинку та алюміній-магнієвих сплавів, і наносяться вони з електролітів різного складу при низьких температурах. Пасивування цинку та його сплавів проводять з електроліту наступного складу:  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$  – 8 г/л  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – 60 г/л  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 20 г/л [2, с.272]. Головним недоліком осажденного КП з даного електроліту є недостатня тривалість захисної дії [3, с.433-440]. Покриття отримані з розчинів молібдату натрію, підкислених сірчаною та азотною кислотами, темніші, більші по товщині, але є більш дефектними, ніж шари, отримані з фосфорної кислоти. Повторна обробка протягом 10 хвилин в 0.3М молібдатних розчинах з рН 3, підкислених фосфорною кислотою, забезпечує високі показники корозійної стійкості КП. Також молібдати використовують в якості добавок до розчинів хімічного оксидування сплавів Al-Mg, в результаті чого формуються захисні конверсійні покриття стійкі до пітингової корозії в середовищах з вмістом хлорид - іонів [4, с. 482–490].

Введення в склад молібдатного конверсійного розчину добавки нітрату амонію значно прискорює утворення покриття на алюмінієвому сплаві, але суттєво не впливає на його захисні властивості. Операція додаткового наповнення таких покриттів в гарячій воді зменшує їх дефектність і призводить до зниження швидкості корозії. Добавка рідкого високомолекулярного скла в лужні молібдатні розчини модифікує конверсійні покриття шляхом включення малорозчинних силікатів алюмінію і підвищує захисні властивості до рівня хроматного, що дозволяє відмовитись від операції наповнення утворених шарів [4, с. 482–490].

Для заліза або маловуглецевої сталі також запропоновано розчини для нанесення молібдатних КП [5, с. 443–446]. Але широкого застосування вони поки не набули і потребують подальшого вивчення та вдосконалення. Відомі роботи про використання молібдатів для процесів пасивації маловуглецевої сталі [6, с. 587–592]. В таких захисних пасивних плівках містяться оксиди заліза з включенням молібдену у невеликій кількості.

**Формулювання цілей статті.** Обґрунтувати склади розчинів для хімічного формування конверсійного покриття на поверхні маловуглецевої сталі, з вмістом оксидів молібдену, шляхом відновлення сполук Mo (VI) до Mo (IV).

**Виклад основного матеріалу.** В даній роботі, для нанесення конверсійних молібдатних плівок використовували хімічний спосіб, шляхом занурення зразків у розчин без зовнішнього зовнішнього струму (імерсійний спосіб). Покриття на нелеговану сталь марки 08кп при кімнатній температурі  $T=18\pm 2^\circ\text{C}$  наносили використовуючи слабокислі розчини на основі хлориду амонію та ацетату цинку (фоновий розчин), в який вводили добавку молібдату амонію, що виступав в якості донорів протонів, г/л:  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 6,0;  $\text{NH}_4\text{Cl}$ –50,0;  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  – 10,0 (робочий розчин з рН 5,3). Оскільки процес відновлення молібдату є катодною реакцією, яка спряжена з анодною реакцією розчинення металу основи, то саме для зменшення швидкості останньої реакції в розчин вводили ацетат цинку [7, с.1835-1845].

Перед формуванням конверсійного покриття зразки знежирювали віденським вапном, протравлювали в розчинах азотної кислоти (1:1) протягом 10 секунд та 20% сірчаної кислоти протягом 2 хвилин.

Поляризаційні вимірювання здійснювали за допомогою потенціостата ПИ–50–1.1 та програматора ПР–8. Швидкість розгортки потенціалу стано-вила 2 мВ/с. Поляризаційні криві записували самописцем ПДА–1. В якості допоміжного використовували платиновий електрод. Значення потенціалів наведені відносно нормального водневого електрода. Для вимірювань застосовували стандартну електрохімічну комірку з об'ємом робочого розчину 170 мл. Застосовували сталеві зразки з робочою поверхнею 1 см<sup>2</sup>.

Поляризаційні криві знімали на сталі або цинку попередньо витримавши зразок в конвертуючому розчині протягом 10 хвилин до встановлення стаціонарного потенціалу. В ряді випадків знімали прямий та зворотний хід катодної кривої, а потім, анодну криву сталі.

Захисну дію сформованих оксидно-молібдатних плівок визначали шляхом витриманням зразків в об'ємі дистильованої води.

Вважається, що в нейтральних розчинах молібдати не відновлюються при потенціалах корозії сталі, але можуть утворювати захисні плівки на більш електронегативних металах, таких як цинк, магній та алюміній. Підкислення розчинів полегшує процес відновлення молібдатів, оскільки реакція відбувається за участю іонів гідрогену.

При зануренні сталі в робочий розчин (рН 5,3), її потенціал зміщується у негативний бік і через 15–20 хвилин досягає постійної величини порядку  $-0,6$  В. Поверхня зразків з 5–6 хв починає темніти і через 10 хв витримки набуває чорного насиченого кольору. Отримане покриття є щільним за структурою і механічно не знімається. Наявність чорних щільних покриттів на поверхні сталі дає підстави для висновку, що молібдати відновлюються на поверхні сталі при потенціалі вільної корозії, з утворенням оксидів молібдену.

При підкисленні робочого розчину соляною кислотою до рН 3,8 формування темних покриттів на сталі відбувалося швидше: зразки починали темніти через 1–2 хв після занурення. Це пояснюється тим, що при підкисленні розчину процес відновлення молібдату відбувається швидше. Колір покриття, в залежності від часу обробки сталеві поверхні, змінювався від райдужного сіро-зеленого відтінку до райдужного фіолетово-синього.

Потенціал сталі в підкисленому розчині (рН 3,8) має більш позитивні значення ніж в робочому розчині, що узгоджується з положенням про зміщення компромісного потенціалу при прискоренні катодної реакції деполяризації. При цьому, виділення водню як в робочому, так і в підкисленому розчинах не спостерігалися.

Співставлення величини потенціалу з анодною кривою (рис. 1) дає можливість стверджувати, що при нанесенні КП сталь знаходиться в активному стані. Пасивний стан досягається при потенціалі порядку  $E \approx -0,25$  В. Але він не є стабільним і при подальшому зміщенні потенціалу в позитивний бік сталь активується. Прискорення розчинення сталі в зоні потенціалів  $E = -0,25$  В на зворотньому ході кривої порівняно з прямим обумовлене пробієм пасивної плівки. Але при потенціалі  $E = -0,3$  В знову спостерігається її утворення і гальмування процесу анодного розчинення сталі.

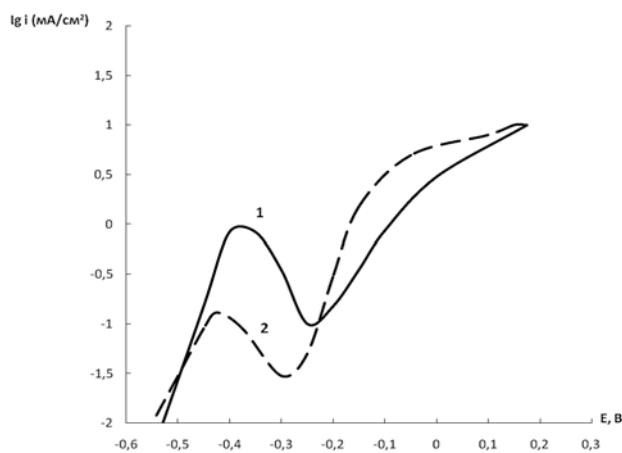


Рис. 1. Прямий (1) та зворотний (2) хід анодної поляризаційної кривої сталі в фоновому розчині  $Zn(As)_2 + NH_4Cl$

Катодні криві в робочому розчині (рис. 2) відображають процеси відно-влення розчиненого кисню та молібдатів, іонів цинку та виділення водню [8, с. 43–47]. Для оцінки швидкості катодного відновлення молібдатів криві порівнювали з такими ж у фоновому розчині без добавки молібдату (рис. 3).

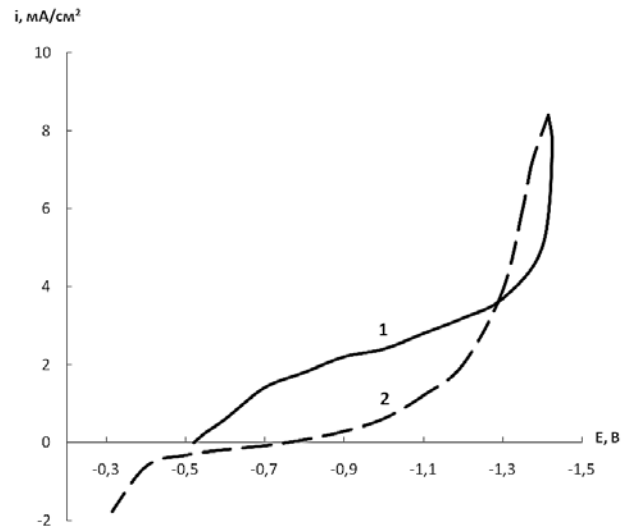


Рис. 2. Прямий (1) та зворотний (2) хід катодної поляризаційної кривої сталі в основному розчині з рН 5,3

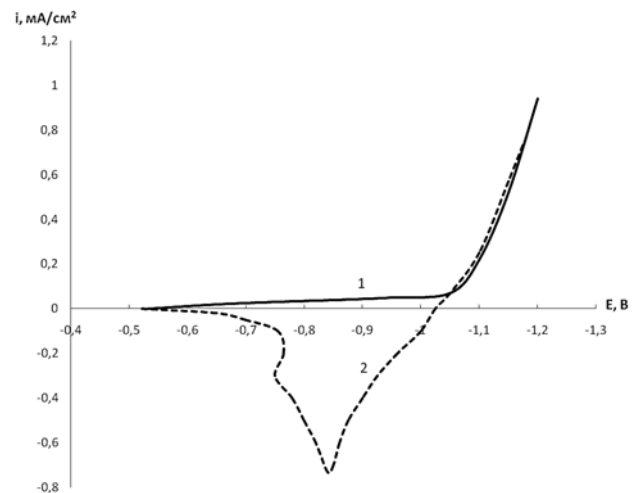
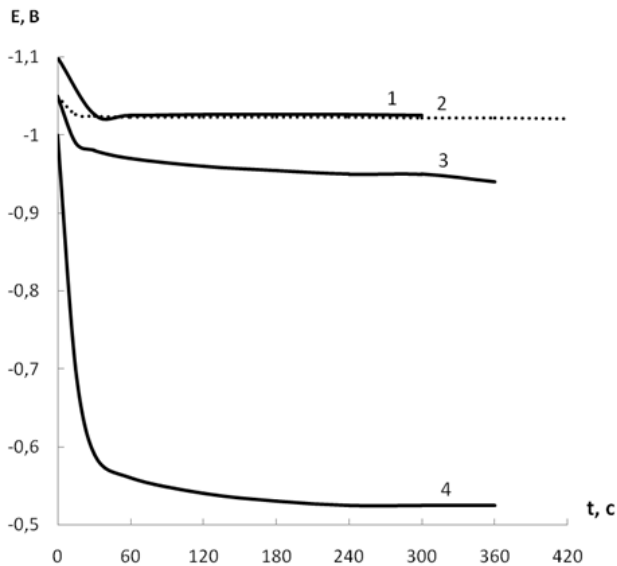


Рис. 3. Прямий (1) та зворотний (2) хід катодної поляризаційної кривої сталі у фоновому розчині  $Zn(As)_2 + NH_4Cl$

У фоновому розчині  $Zn(As)_2 + NH_4Cl$  (рис. 3) на катодній кривій спостерігається ділянка граничного струму  $i_{пр} \approx 10^{-2}$   $mA/cm^2$ , яка відповідає реакції відновлення кисню. При потенціалі  $E = -1,05$  В спостерігається різке зростання струму, що може пояснюватися початком процесу виділення водню або осадження цинку, або перебігом обох цих процесів. На зворотньому ході кривої виникає анодний струм, який збільшується до максимуму, а потім зменшується до нуля. Це свідчить про те, що при

знятті прямого ходу кривої за негативних потенціалів утворився осад цинку, який при знятті зворотного ходу кривої починає анодно розчинятись. Якщо після зняття поляризаційної кривої струм вимикали, встановлювалось значення потенціалу близьке до  $E = -1,0$  В, що свідчило про те, що осад цинку нав'язує парі цинк-залізо свій потенціал.



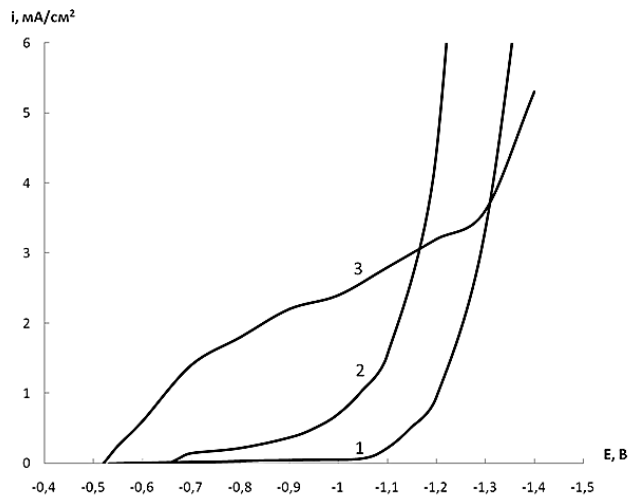
**Рис. 4.** Зміна потенціалу сталі в часі у фоновому розчині  $Zn(Ac)_2 + NH_4Cl$  після відключення поляризації. Потенціал попередньої поляризації  $E = \text{const}$  (В):  
1 – (-1,25); 2 – (-1,1);  
3 – (-1,05); 4 – (-1,0);

Поляризація сталевого зразка (рис. 4) до  $E = -1,0$  В є недостатньою для початку процесу осадження цинку на поверхні: після відключення струму встановлюється потенціал чистої сталі близький до  $E = -0,52$  В. Поляризація до  $E = -1,05$  В призводить до появи слідів цинку на сталі; але після вимкнення струму потенціал поступово зміщується в позитивний бік і через 20–25 хв. досягає потенціалу сталі. При більш негативних значеннях, після вимкнення струму потенціал залишався постійним, рівним стаціонарному потенціалу цинку. Таким чином, експериментальні дані свідчать, що відновлення цинку починається при потенціалі  $E = -1,05$  В.

Для визначення потенціалу та кінетики процесу відновлення водню також знімали поляризаційні катодні криві в фоновому розчині на основі ацетату натрію (рис. 5).

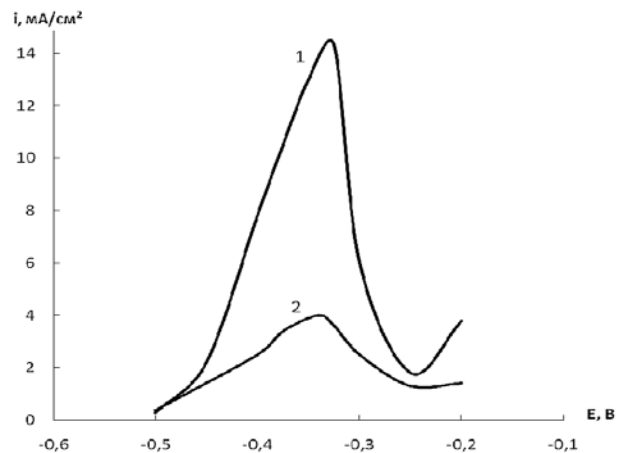
Порівняння катодних кривих сталі в робочому розчині з кривими у фонових розчинах (рис. 5) свідчить про те, що в діапазоні потенціалів від стаціонарного  $E = -0,52$  В до приблизно  $E = -1,0$  В домінуючим процесом є відновлення молібдату; швидкість якого майже на порядок вище, ніж швидкість побічного процесу. Відчутний осад цинку був

виявлений при потенціалі  $E = -1,45$  В. Отже, утворена при відновленні молібдатів плівка гальмує як осаждення цинку, так і виділення водню з води.



**Рис. 5.** Катодні криві на сталі в фонових розчинах  $Zn(Ac)_2 + NH_4Cl$  (1) та  $NaAc + NH_4Cl$  (2) і в робочому розчині з рН 5,3 (3)

Анодні криві, зняті після прямого ходу катодних, свідчать про те, що конверсійні покриття суттєво гальмують анодне розчинення сталі (рис. 6).



**Рис. 6.** Анодні криві на сталі без (1) та з конверсійним покриттям (2) в фоновому розчині

**Висновки.** Дослідження показали, що конверсійні покриття з оксидів молібдену можуть утворюватись на маловуглецевій сталі без зовнішньої поляризації в холодних конверсійних розчинах з додакою полімерного молібдату амонію. Прискорення цього процесу можна досягти катодною поляризацією сталі. Обґрунтовано доцільність використання хлориду амонію та ацетату цинку як основних компонентів розчину для формування оксидно-молібденових щільних покриттів чорного кольору (рН 5,3) або райдужного з різними відтінками (рН 3,8).

Список літератури:

1. Frolenkova S.V., Vorobyova V.I., Overchenko T.A., Skiba M.I. Ecologically safe modified solutions for deposition of conversion coatings on steel. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 6. P. 65–71.
2. Технічна електрохімія. Ч. 3. Гальванічні виробництва: Підручник/ За ред. Б. І. Байрачного. Харків: НТУУ «ХПІ», 2006. 272 с.
3. Magalhaes A., Mar gar a ICE, Marios OR. J. Molybdate conversion coatings on zinc surfaces. *Electroanalytical Chemistry*. 2004. № 2. P. 433–440.
4. SeJin Ahn., HyukSang Kwon, Macdonald D. Role of Chloride Ion in Passivity Breakdown on Iron and Nickel. *J. Electrochem. Soc.* 2005. V. 152. № 1. P. 482–490.
5. Frolenkova S., Overchenko T., Motronyuk T. Passivating anions effect on the anodic behavior of steel in a converting acetate solution. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019. № 54(2). P. 443–446.
6. Донченко М.І, Срібна О.Г., Будицько С.В. Електрохімічне відновлення іонів молібдату при формуванні захисних конверсійних покриттів на сталі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Проблеми корозії та протикорозійного захисту металів. Спец. вип.* 2008. № 7. С. 587–592.
7. Azambuja D.S., I.L.Muller. The influence of acetate concentration on the dissolution of iron in aqueous solutions. *Corrosion Science*. 1994. V. 36. I. 11. P. 1835–1845.
8. Донченко М. І., Фроленкова С. В., Спрунчук В. І. Захист сталі від корозії в охолоджену розчині на основі ацетату калію. *Вісник національного технічного університету «ХПІ», тематичний випуск «Хімія, хіміятехнологія та екологія*. 2008. № 15. С. 43–47.

**Frolenkova S.V. FORMATION OF CONVERSION MOLYBDATE COATINGS ON STEEL FOR PROTECTION FROM ATMOSPHERIC CORROSION. Part 1. MOLYBDENUM (IV) OXIDE FILMS FORMATION ON STEEL BY REDUCTION OF MOLYBDATE**

*The article analyzes the current state of protection of low-carbon steels by applying conversion coatings against atmospheric corrosion. The author pays special attention to molybdenum protective layers, which are gaining more and more popularity as a modern environmentally safe alternative to chromium-containing films.*

*The author proposed chloride-acetate solutions for applying molybdate conversion protective coatings. The expediency of each component is substantiated.  $\text{NH}_4^+$  ions, introduced into the solution as ammonium molybdate, act as proton donors and significantly accelerate the reactions of reduction of molybdates to molybdenum (IV) compounds.*

*The author proved the effectiveness of the introduction of zinc acetate into the solution to reduce the rate of dissolution of the base metal. An important characteristic of the proposed solution for applying conversion molybdate coatings is also that it is used at room temperature. This significantly simplifies the technology of its application, excluding the factor of the need for heating equipment and special ventilation to remove vapors.*

*Solutions with pH 5.3 and 3.8 were used in the work to form molybdate conversion coatings. At the same time, it was established that acidification of the working solution with hydrochloric acid to pH 3.8 contributes to the accelerated formation of dark coatings on steel: the samples begin to darken after 1–2 minutes after immersion, while in solutions with pH 5.3, the color change began after 8–10 minutes of exposure in the volume.*

*This is consistent with the fact that when the solution is acidified, the process of molybdate recovery occurs faster. The author established and showed that cathodic polarization of the steel surface also accelerates the formation of dense molybdenum oxide layers. Their protective effect is also confirmed on the anodic curves, which show a 3.5-fold reduction in the dissolution currents of the steel surface with the applied conversion coating compared to the untreated one. The color of such protective layers, depending on the processing time, changes from iridescent gray-green shade to iridescent violet-blue.*

**Key words:** conversion coatings, oxide-molybdenum layers, cathodic and anodic polarization, atmospheric corrosion.

# ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 633.522:664.78.01

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/18>**Петраченко Д.О.**

Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук України

**Дудукова С.В.**

Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук України

## ОГЛЯД ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ З ТОЧКИ ЗОРУ ПЕРЕРОБКИ

У статті відмічається, що процеси збирання, післязбиральної обробки та перероблення насіння конопель вимагають ретельного підходу, інноваційного обладнання та технологій, які враховують специфіку даної рослини. Визначено, що фізико-механічні характеристики насіння впливають на показники якості та ефективності роботи обладнання на всіх етапах його переробки. Метою статті є огляд та аналіз фізико-механічних характеристик насіння промислових конопель з точки зору переробки.

В результаті аналізу з'ясовано, що насіння конопель має середню довжину 4,49-5,21 мм, ширину 3,30-4,41 мм, товщину 2,65-3,30 мм. Збільшення вологості насіння на 21,73% призводить до збільшення довжини на 7,13%, ширини – на 9,42%, товщини – на 2,18%. Максимальна вологість насіння для посівного матеріалу дорівнює 13%, а для перероблення – 11%. Визначено, що маса 1000 насінин залежить від умов вирощування, сорту, фракції та складає 9,80-20,40 грам. Аналіз показав, що зі збільшення вологості маса 1000 насінин збільшується. З'ясовано, що об'ємна щільність насіння дорівнює 380,0-597,0 г/л, а зі збільшенням вологості насіння вона зменшується. Аналіз показав, що дійсна щільність насіння конопель знаходиться в межах 689,0-907,0 г/л, а зі збільшенням вологості насіння вона зменшується. Встановлено, що пористість насіння складає 34,66-45,64%, а зі збільшенням вологості (на 21,73%) пористість насіння збільшується (на 7,16%). Кут природного ухилу для насіння конопель 21,75<sup>0</sup>-27<sup>0</sup>, і зі збільшенням вологості насіння він збільшується. Визначено, що статичний коефіцієнт тертя в залежності від поверхні дорівнює 0,267-0,347. Зі збільшенням вологості насіння статичний коефіцієнт тертя для насіння конопель збільшується, при чому для всіх досліджуваних поверхонь.

У статті розкрито важливість розуміння фізико-механічних характеристик насіння промислових конопель при проектуванні та розробці обладнання та технологій. Розуміння та врахування фізико-механічних характеристик насіння промислових конопель у процесах збирання, післязбиральної обробки та переробки насіння може сприяти підвищенню ефективності виробництва та забезпеченню якості продукції.

**Ключові слова:** коноплі, насіння, властивості, переробка, фізико-механічні характеристики.

**Постановка проблеми.** Конопляне насіння та продукти його переробки відіграють важливу роль у харчовій промисловості, зокрема, з точки зору продукції з високими поживними властивостями. Завдяки наявним в насінні вітамінам, мікроелементам, білкам, клітковині та незамінним жирним кислотам конопляне насіння має високу харчову цінність, а такі продукти його переробки, як ядро та олія можуть використовуватися в різних галузях харчової промисловості [1 с. 26–28].

Процес збирання, післязбиральної обробки та переробки насіння конопель вимагає ретельного підходу, сучасного обладнання та технологій, які враховують специфіку даної рослини. Фізико-механічні

характеристики насіння конопель мають вплив на ефективність роботи обладнання на всіх етапах його переробки. Вивчення фізико-механічних характеристик насіння є актуальним напрямом досліджень, а їх результати можуть сприяти розробці нових методів та підходів до очищення, розділення, сортування, обрушування та сепарації насіння. Це дозволить підвищити ефективність роботи обладнання, зменшити матеріальні та енергетичні витрати, а також забезпечити збереження корисних властивостей насіння та продуктів його переробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато науковців проводили дослідження щодо фізико-механічних характеристик насіння різ-

них сільськогосподарських культур [2–6]. В своїх роботах вони відмічають важливість вивчення механіко-технологічних характеристик насіння, їх вагомий вплив на процеси переробки, налаштування обладнання для досягнення оптимального рівня його роботи та якості одержаної продукції.

Під час роботи з насіннєвим матеріалом фізико-механічні характеристики мають важливе значення для визначення параметрів обробки, впливають на продуктивність, енергоспоживання та зношуваність робочих органів. Складання моделей та математичних залежностей, встановлення оптимальних та раціональних параметрів робочих органів, визначення режимів роботи устаткування неможливе без розуміння властивостей насіннєвого матеріалу [5–6]. Серед фізико-механічних характеристик насіння виділяють форму, розмір, питому вагу, зовнішню структуру оболонки, статичний коефіцієнт тертя тощо [6].

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є огляд та аналіз фізико-механічних характеристик насіння промислових конопель, які впливають на процес збирання, післязбиральної обробки та перероблення насіння.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що форма та розмір насіння відрізняються не тільки між різними видами рослин, але і між сортами одного виду та навіть в межах одного сорту. Кожне насіння вимірюється за трьома геометричними параметрами: довжиною (L), шириною (B) та товщиною (T). Знаючи один заданий параметр можна розділити насіння за будь-яким з розмірів [7–8].

Насіння промислових конопель має наближену до еліптичної, округло-яйцеподібну форму, злегка стиснуте з боків. Розмір насінини істотно відрізняється в межах одного сорту [1, с. 26]. За даними [1, с. 8] насіння конопель має середню довжину в межах 4,49–5,21 мм, ширину 3,30–4,41 мм, товщину 2,65–3,30 мм. В роботі Саїні П. та інші (2022) відмічають наступні розміри насіння конопель: довжина 3,78–4,48 мм, ширина 2,80–3,48 мм, товщина 2,28–2,93 мм [9]. За даними Клевцова К. (2015) геометричні розміри насіння промислових конопель становлять: довжина 5,25 мм, ширина 3,60 мм, товщина 2,70 мм [10].

В роботі Тахері-Гараванд А. та інші (2012) зазначають, що на розмір насіння конопель істотний вплив має його вологість [11]. Збільшення вологості насіння на 21,73% (з 5,39 до 27,12%) призводить до збільшення осьових розмірів насінини: довжини на 7,13% (з 4,60 до 4,95 мм), ширини на 9,42% (з 3,56 до 3,93 мм) та товщини на 2,18% (з 2,93 до 3,23 мм).

Розмір насіння конопель виступає основним фактором при розділенні насіння на фракції, впливає на умови сортування та процес сепарації. Інформація про розміри насіння дозволяє визначити необхідні конструктивні розміри отворів у конструкції переробного та сортувального обладнання. Крім того, розуміння впливу розміру насіння на ефективність перероблення (обрушування) може сприяти розробці нових методів та технологій, які покращать процеси обрушування та зменшать час переробки сировини. Це може включати вдосконалення існуючого обладнання, розробку нових конструкцій, а також адаптацію технологій з інших галузей або культур.

Вологість насіння (W) є фізичною величиною, що визначає кількість води, яка міститься в насінні у відсотках до його сухої маси. Волога в насінні може міститися у вигляді конституційної вологи, яка хімічно зв'язана з насінням, та гігроскопічної вологи, яка вбирається з навколишнього середовища [12, с. 21]. Для насіння конопель згідно з ДСТУ [13] в залежності від напряму використання встановлено різні значення максимальної вологості. Для насіння, яке буде використовуватися в якості посівного матеріалу рекомендована вологість дорівнює 13,0%, а для насіння, що заготовляють для перероблення вологість становить 11,0%.

У контексті переробки вологість насіння може впливати на ефективність таких процесів, як очищення, сортування, обрушування, пресування. Вологість насіння впливає на величину коефіцієнта внутрішнього тертя [8, с. 48]. Надмірна вологість призводить до злипання насіння, утруднюючи сепарацію та підвищуючи енергозатрати на переробку. Також надмірна вологість може створювати сприятливе середовище для розвитку грибків та плісняви, які будуть погіршувати якість насіння в процесі зберігання.

Показник маси 1000 насінин ( $m_{1000}$ ) відіграє важливу роль в оцінці якості насіння. Цей показник дає можливість визначити не тільки виповненість насіння, але й оцінити його однорідність та потенційну схожість [7]. Важливо зауважити, що маса 1000 насінин може змінюватися в залежності від умов вирощування, генетичних факторів, а також від фракційного розміру насіння та його вологості. Тому для отримання точної оцінки якості насіння слід враховувати ці фактори.

За нашими даними показник маси 1000 насінин для партії насіння промислових конопель товарного напряму селекції Інституту луб'яних культур (ІЛК) знаходився в межах 17,3–19,2 г при вологості насіння 8,3–10,1%. Встановлено, що



у крупнішого насіння більша маса і зі збільшенням вологості маса насінин зростає. В роботі [11] також зазначають, що зі збільшенням вологості конопляного насіння збільшується показник маси 1000 насінин. Так маса насіння збільшилась лінійно на 4,7 г (з 19,26 до 23,96 г) при збільшенні вологості на 21,73%.

В роботі [10] відмічається, що маса 1000 насінин становила 17,72 г. В дослідженнях [9] автори відмічають, що маса 1000 насінин знаходилась в межах 9,80–20,40 г. Для дрібного насіння маса 1000 насінин складала від 9,80 до 11,41 г, а для крупного – 15,17–20,40 г. Йіан та інші (2018) зазначають, що показник маси 1000 насінин становив 12,35–14,13 г за вологості насіння 9,0–15,0% [14].

Об'ємна щільність насіння відіграє роль у процесах сортування, очищення та переробки насіння. Розуміння значення об'ємної щільності може допомогти оптимізувати різні аспекти виробничого процесу та покращити якість продукції. Об'ємна щільність насіння ( $\rho_b$ ) – це фізична величина, що визначає співвідношення маси до об'єму. Величина даного показника характеризує масу зерна (г) в одиниці об'єму (л). Використовується для оцінювання технологічних якостей насіння, розрахунку необхідних ємностей, визначення маси насіння в заданому об'ємі [7].

За нашими даними об'ємна щільність насіння промислових конопель становить 503,8–530 г/л. Зокрема, при вологості насіння 9,7% об'ємна щільність складала 504,7 г/л, а при вологості 8,7% – 520,2 г/л. Згідно з дослідженнями [10] об'ємна щільність насіння промислових конопель дорівнювала 513 г/л.

В роботі [9] зазначається, що середнє значення об'ємної щільності конопляного насіння знаходилось в межах 442,0–546,0 г/л. При чому для дрібного насіння мінімальне та максимальне значення об'ємної щільності складало 380,0 та 597,0 г/л відповідно. Для крупного насіння мінімальна об'ємна щільність дорівнювала 412 г/л, а максимальна – 593 г/л.

Результати досліджень [11] показують зменшення об'ємної щільності насіння конопель зі збільшенням його вологості. Автори зазначають, що зі збільшенням вологості насіння конопель на 21,73% його об'ємна щільність зменшується на 7,44 г/л. На думку авторів дана тенденція свідчить, що збільшення маси в результаті підвищення вологості зразка є нижчим, ніж супутнє об'ємне розширення.

Для насіння промислових конопель об'ємна щільність може слугувати індикатором його

якості, використовуватися для визначення параметрів пакування, адже впливає на кількість насіння, яку можна розмістити в обмеженому об'ємі. Також використовуватися при визначенні умов транспортування, розрахунку обладнання, бункерів, причепів тощо де необхідне чітке розуміння співвідношення маса-об'єм.

Дійсна щільність насіння ( $\rho$ ) – це фізична характеристика, що вказує на його масу в грамах на одиницю об'єму в кубічних сантиметрах [7, с. 5]. Для встановлення дійсної щільності визначену пробу насіння занурюють у спеціальну рідину (толуол), яка добре змочує його поверхню [15].

В роботі [9] відмічається, що середнє значення для дійсної щільності насіння конопель знаходилось в межах 747,0–835,0 г/л. Для дрібного насіння мінімальне та максимальне значення дійсної щільності складало 689,0 та 907,0 г/л відповідно. Для крупного насіння мінімальна дійсна щільність дорівнювала 742 г/л, а максимальна становила 877 г/л.

Збільшення вологості насіння призводить до зменшення його дійсної щільності. При збільшенні вологості на 21,73% дійсна щільність насіння зменшилась на 132,28 г/л [11].

Знаючи об'ємну та дійсну щільність насіння конопель, можна визначити його пористість ( $\varepsilon$ ) як відношення різниці дійсної та об'ємної щільності до дійсної щільності [6]. Пористість характеризує наявність в насінні пор, через які протікає газообмін між насінням та зовнішнім середовищем, має важливе значення для правильного тривалого зберігання.

Збільшення вологості насіння конопель призводить до збільшення його пористості. При збільшенні вологості насіння на 21,73% пористість насіння збільшується на 7,16% [11]. За даними [9] середнє значення пористості для насіння конопель знаходилось в межах 34,66–45,64%. Для дрібного насіння мінімальне та максимальне значення пористості дорівнювало 34,01 та 44,85% відповідно. Для крупного насіння мінімальна пористість дорівнювала 32,21%, а максимальна становила 47,25%.

Кут природного ухилу є властивістю насіння переміщатися вздовж поверхні, розташованої під деяким кутом відносно горизонту. Врахування даної властивості насіння, під час роботи з насінними масами, дозволяє мінімізувати затрати ручної праці в процесі переміщення насіння конвеєрами та пневмотранспортними установками, самопливом, під час завантаження та розвантаження бункерів, причепів тощо [16]. Кут при-

родного ухилу визначається як арктангенс відношення подвійної висоти до діаметра купи насіння, яка розміщена на круглій пластині [6].

Для насіння промислових конопель кут природного ухилу збільшується зі збільшенням вологості насіння. Згідно з результатами дослідження [11] при вологості насіння 5,39% кут природного ухилу дорівнював 21,75°, а при вологості насіння 27,12% кут природного ухилу збільшився до 23°. На думку авторів [11] при підвищеній вологості для насіння характерний ефект пластичності та злипання, в результаті чого виникає менша текучість та краща стабільність, що призводить до збільшення кута природного ухилу. В дослідженнях [7] відмічається, що при вологості насіння 7,7% кут природного ухилу дорівнював 27°.

Кут природного ухилу для насіння промислових конопель характеризує поведінку насіння при насипанні, транспортуванні, зберіганні. Він визначає найбільший кут, під яким може утворитись схил вільно насипаного насіння в стані рівноваги з горизонтальною площиною. Кут природного ухилу впливає на такі аспекти, як проектування бункерів та ємностей для зберігання насіння, транспортування насіння, роботу обладнання для сортування та очищення насіння, технологічні процеси його переробки.

Статичний коефіцієнт тертя – це показник, який характеризує відношення сили тертя до сили нормального навантаження між двома тілами, що перебувають у контакті та знаходяться в стані рівноваги. Статичний коефіцієнт тертя для насіння визначається, коли насінина, яка знаходиться на похилій поверхні, зі стану спокою переходить до стану руху в момент, коли рухома сила дорівнює максимальному значенню сили тертя. Статичний коефіцієнт тертя більший за коефіцієнт динамічного тертя, оскільки сила тертя, необхідна для початку руху тіла вища, ніж сила тертя, яка діє під час його руху. Значення статичного коефіцієнта

тертя залежить від матеріалів, що контактують, їх шорсткості, температури та вологості поверхонь. Статичний коефіцієнт тертя визначається як тангенс кута, при якому насіння починає ковзати по поверхні [7].

В [7] зазначається, що статичний коефіцієнт тертя насіння конопель для дерева складає 0,33–0,41, для сталі – 0,31–0,38, для гуми – 0,36–0,44. В роботі [11] відмічається, що статичний коефіцієнт тертя для насіння конопель збільшується зі збільшенням вологості насіння. При чому ця тенденція спостерігається для всіх поверхонь, які досліджували. При вологості 5,39% статичний коефіцієнт тертя дорівнював: 0,347 для скла, 0,286 для оцинкованого заліза, 0,267 для фанери. Зі збільшенням вологості насіння до 27,12% статичний коефіцієнт тертя збільшився і дорівнював 0,459 для скла, 0,438 для оцинкованого заліза, 0,410 для фанери.

**Висновки.** Розуміння фізико-механічних характеристик насіння промислових конопель відіграє важливу роль в проектуванні та розробці обладнання та технологій, що забезпечують високу якість та ефективність проведення технологічних операцій. Урахування фізико-механічних характеристик насіння допоможе адаптувати технологічне обладнання до конкретних умов виробництва, що дозволить досягти оптимальної якості продукції та мінімізувати втрати насіння під час обробки та переробки. Розуміння та врахування фізико-механічних характеристик насіння промислових конопель у процесах збирання, післязбиральної обробки та переробки насіння може сприяти підвищенню ефективності виробництва та забезпеченню конкурентоспроможності продукції на ринку. Подальше вивчення властивостей насіння промислових конопель дозволить розробити більш ефективні методи сортування, очищення та обрушування насіння, що забезпечить кращу якість продукції та зниження витрат на виробництво.

#### Список літератури:

1. Коноплі: монографія / за ред. М.Д. Мигалія, В.М. Кабанця. Суми: Видавничий будинок «Еллада», 2011. 384 с.
2. Нанка О.В., Бакум М.В., Кречот М.М. Дослідження мінливості розмірних характеристик насіння зернових культур. *Інженерія природокористування*. 2019. № 2(12). С. 90-95
3. Фадеев Л. Пофракційність – обов'язкова складова при очищенні зерна та виробництві насіння. *Agroone* № 70 С. 10-12
4. Костецька К.В., Герасимчук О.П. Підвищення якості сої фракціонуванням насіння. *Вісник уманського національного університету садівництва*. 2022. № 1. С.70-76. doi: 10.31395/2310-0478-2022-1-70-76
5. Гошко З., Крунич О., Крунич Р. Дослідження фізико-механічних властивостей плодів лісових горіхів. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. № 21. 2017. С. 30-37.
6. Алієв Е.Б., Лупко К.О. Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. № 50 С. 27-35. doi: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>

7. Хайліс Г.А., Федорусь Ю.В. Механіка рослинних матеріалів. Луцьк, 2004. 302 с.
8. Царенко О.М., Войтюк Д.Г., Швайко В.М. та ін. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник / за ред. С.С. Яцуна. Київ: Мета, 2003. 448 с.
9. Saini P., Panghal A., Mittal V., Gupta R. Hemp seed (*Cannabis sativa* L.) bulk mass modeling based on engineering properties. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. №45. doi:10.1111/jfpe.13929.
10. Клевцов К.М. Фізико-технологічні властивості і хімічний склад насіння льону та конопель. *Вісник Харківського національного технічного університету*. 2015. № 4. С. 104-110.
11. Taheri-Garavand A., Nassiri A., Gharibzahedi S. Physical and mechanical properties of hemp seed. *International agrophysics*, 2012. № 26(2). P. 211-215. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0031-9>
12. Думекно К.М., Павлюченко І.С. Фізико-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: курс лекцій. Миколаїв: МНАУ, 2014. 39 с.
13. ДСТУ 7695:2015 Насіння конопель. Технічні умови. [Чинний від 2015-05-28]. Вид. офіц. ДП «УкрНДНЦ». Київ, 2015. 8 с.
14. Jian F., Yavari S., Narendran, R., Jayas D. S. Physical properties of Finola hemp seeds: clean and containing dockages. *Applied Engineering in Agriculture*. 2018. №34(6). P. 1017–1026. <https://doi.org/10.13031/aea.12853>
15. Bagherpour H., Minaei S., Khoshtaghaza M. Selected physico-mechanical properties of lentil seed. *Int. Agrophys.* 2010. № 24. P. 81-84.
16. Подпратов Г.І., Скалецька Л.Ф., Сеньков А.М., Хилевич В.С. Зберігання і переробка продукції рослинництва. Київ: Мета, 2002. 495 с.

#### **Petrachenko D.O., Dudukova S.V. REVIEW OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL HEMP SEEDS IN TERMS OF PROCESSING**

*The article notes that the processes of harvesting, postharvest handling and processing of hemp seeds require a careful approach, innovative equipment and technologies that take into account the specifics of this plant. It was determined that the physical-mechanical properties of seeds affect the quality and efficiency of equipment operation at all stages of processing. The aim of this article is to review and analyze the physical-mechanical properties of industrial hemp seeds from a processing perspective.*

*As a result of the analysis, it was found that hemp seeds have an average length of 4.49-5.21 mm, width of 3.30-4.41 mm, and thickness of 2.65-3.30 mm. An increase in seed moisture on 21.73% leads to increase a length on 7.13%, width– 9.42%, and thickness– 2.18%. The maximum seed moisture content for sowing material should be 13%, and for processing - 11%. It was determined that the weight of 1000 seeds depends on growing conditions, variety, fraction, and ranges from 9.80 to 20.40 grams. The analysis showed that with an increase of the moisture content, the weight of 1000 seeds increases. It was found that the bulk density of seeds is 380.0-597.0 g/l and with increasing of seed moisture content, bulk density decreases. The analysis showed that it was found that the true density of hemp seeds ranged from 689.0 to 907.0 g/l and with an increase of seed moisture content, the true density decreases. It was founded that seed porosity is 34.66-45.64% and with an increase of the moisture content (on 21.73%), seed porosity increases (on 7.16%). The natural angle of inclination of hemp seeds is 21.75°-27° and with an increase of seed moisture content, the natural angle of inclination increases. It was founded that the static friction coefficient depending on the surface is 0.267-0.347. With an increase of seed moisture content, the static friction coefficient for hemp seeds increases, for all investigated surfaces.*

*The article reveals the importance of understanding of the physical-mechanical properties of industrial hemp seeds at designing and developing of equipment and technologies. Recognizing and considering of the physical-mechanical properties of industrial hemp seeds in harvesting, postharvest handling, and seed processing can contribute to increased production efficiency and product quality assurance.*

**Key words:** hemp, seed, properties, processing, physical-mechanical characteristics.

УДК 621.37:637.142.

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/19>

**Святненко Р.С.**

Національний університет харчових технологій

**Маринін А.І.**

Національний університет харчових технологій

**Шевченко О.Ю.**

Національний університет харчових технологій

**Позняк О.М.**

Національний університет харчових технологій

**Литвинчук С.І.**

Національний університет харчових технологій

## ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА ОРГАНОЛЕПТИЧНІ ПОКАЗНИКИ МЕДУ РІЗНОГО БОТАНІЧНОГО ТА ОДНОГО РЕГІОНАЛЬНОГО ПОХОДЖЕННЯ

*У статті наведено дослідження по вивченню якості меду різного походження за органолептичними та фізико-хімічними показниками. У ході дослідження було досліджено мед різного походження, зокрема гречаний, соняшниковий, квітковий та липовий з Бориспільського району Київської області. Для визначення органолептичних та фізико-хімічних показників використовували стандартизовані методи дослідження.*

*Отримані результати дослідження меду різних видів свідчать про відповідність якісних показників продукту вимогам ДСТУ 4497:2005 «Мед натуральний. Технічні вимоги». Органолептична оцінка меду була проведена за кольором, запахом, смаком та консистенцією. Мед гречаний мав темно-коричневий колір, приємний аромат та смак без сторонніх присмаків, в'язку консистенцію. Мед соняшниковий мав золотисто-жовтий колір, яскравий та ніжний аромат, солодкий смак без сторонніх присмаків, в'язку консистенцію. Мед липовий мав блідо-жовтий колір, приємний та ніжний аромат, солодкий смак без сторонніх присмаків, в'язку консистенцію. Мед квітковий мав світло-коричневий колір, приємний аромат та смак без сторонніх присмаків, солодкий та терпкий, в'язку консистенцію.*

*Фізико-хімічні параметри меду були визначені на основі стандартизованих методів дослідження. Масова частка води у меді гречаного складає 19,4%, у соняшникового – 18,5%, у квіткового – 20%, а у липового – 20,5%. Масова частка сахарози у меді гречаного складає 5,5%, у соняшникового – 4,5%, у квіткового – 8%, а у липового – 3,5%. Показники рН меду також відрізнялися залежності від типу меду. У гречаного меду показник складає 4, у соняшникового – 3,9, у квіткового – 20, а у липового – 4,3.*

*За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що якість меду відповідає встановленим нормам та стандартам й його якість є високою.*

**Ключові слова:** мед, органолептичні показники, фізико-хімічні показники, ботанічне походження меду.

**Постановка проблеми.** Мед – це популярний природний продукт, який споживають не тільки за його смаком і поживною цінністю, а й за його корисні властивості для здоров'я.

Якість меду залежить від вмісту води, співвідношення фруктози/глюкози, географічного походження квітів, факторів навколишнього середовища, пори року [1, с. 309, с. 2, 2099].

Завдяки характеристикам, що визначаються регіоном або конкретним місцевим середовищем та флорою, мед можна класифікувати як преміальний

продукт, який вважається як високоякісний і цінний завдяки своєму бажаному смаку та аромату. На хімічний склад і властивості меду можуть впливати різні фактори, такі як сезон, екологічні умови та ботанічне походження джерела нектару. Основними хімічними складовими меду є цукор і вода, які зазвичай становлять 80% вуглеводів (головним чином фруктози і глюкози) та 17% води, хоча інші речовини, такі як вітаміни, білки, ферменти, органічні кислоти, біологічні сполуки та мікроелементи, також присутні у менших кількостях [3, с. 126].

Завдяки своїй поживній цінності мед використовується в народній медицині протягом тисячоліть, адже він має потенційні антибактеріальні, протизапальні та антиоксидантні властивості, що дозволяють використовувати його для лікування різних захворювань [4, с. 3]. Також даний продукт маючи свої природні корисні властивості, використовується як підсолоджувач в оброблених продуктах харчування, хоча його ринкова вартість значно вища, ніж у інших підсолоджувачах, таких як цукрові сиропи з кукурудзи, тростини, цукрового буряка та сиропи природного походження [5, с. 1074].

Актуальною проблемою в багатьох країнах, у зв'язку з зростанням глобальної торгівлі, стає фальсифікація харчових продуктів. Серед продуктів харчування, мед вважається одним з найбільш вразливих до такої фальсифікації [6, с. 2107].

Автор [6, с. 2108] стверджує, що фальсифікація меду є серйозною проблемою в харчовій індустрії. Основними методами фальсифікації меду є додавання цукру, сиропів, води або інших речовин до натурального меду. Такі дії погіршують якість продукту та підривають довіру споживачів до виробників меду.

Інші проблеми пов'язані з фальсифікацією меду включають недобросовісну конкуренцію та збитки для законних виробників меду. Фальсифікація меду також може мати серйозний вплив на здоров'я споживачів, оскільки мед, який містить додаткові інгредієнти, штучні добавки та консерванти, може бути шкідливим для людського організму [7, с. 226].

Регламент Європейського Союзу встановив загальний стандарт якості бджолиного меду для характеристики меду або медових сумішей, підтвердження походження та виявлення фальсифікації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Мед має дуже різноманітний хімічний склад, а його фізико-хімічні показники є важливими критеріями при контролі якості та натуральності. Зусиллями дослідників було виявлено понад двісті різних компонентів, серед яких вуглеводи, ферменти, азотисті сполуки, кислоти, вітаміни, а також мінеральні, барвники та ароматичні сполуки, вода та пилок квітів. Вміст води в меді залежить від кліматичних умов під час збору меду, від співвідношення цукрів (чим вищий вміст фруктози, тим вища вологість), а також умов зберігання. Зрілий мед має вологість не більше 21%, кристалізується в однорідну масу і може зберігатися тривалий час без втрати природних властивостей [8, с. 41].

Автор [9, с. 646] стверджує, що надмірна кількість води в меді негативно впливає на його термін зберігання, тому це є критичним питанням. Рівень

вологості в меді залежить від умов зберігання, збирання та кліматичних умов, що може погіршувати фізичні властивості меду, наприклад, його в'язкість та здатність до кристалізації.

Мед складається зі значної кількості вуглеводів, зокрема моно-, ди-, три- та олігосахаридів, які мають різне вмістове співвідношення залежно від походження меду. На сьогоднішній день для аналізу меду використовують тільки три головні складові вуглеводів – глюкозу, фруктозу та сахарозу. Глюкоза та фруктоза є основними складовими вуглеводами меду, які визначають його основні якості, такі як солодкість, високу поживну цінність, кристалізацію та гігроскопічність. Редуруючі цукри утворюються з сахарози під час дозрівання меду та є показником його натуральності. Вміст сахарози у натуральному меді є незначним та може зменшуватися протягом зберігання у результаті процесу самоінверсії, коли сахароза перетворюється на фруктозу та глюкозу за впливом ферментів та органічних кислот. Мед, що підроблений штучно інвертованим цукром, містить більший відсоток сахарози через неповну інверсію [10, с. 340].

В експертизі меду особливе місце відведено діастазі – ферменту, що перетворює крохмаль в цукор. Діастазне число натурального меду залежить від зони збору нектару і є показником ступеня нагрівання та тривалості зберігання меду, оскільки діастаза, як і інші ферменти, дуже чутлива до нагрівання. При нагріванні та тривалому зберіганні ферменти та інші корисні дієтичні та лікувальні компоненти меду руйнуються. Вміст діастази залежить від виду та в'язкості нектару: чим більша його в'язкість, тим більше цього ферменту бджоли вводять у мед [11, с. 343].

**Постановка завдання.** Метою статті є вивчення якості меду різного ботанічного та одного регіонального походження та відповідність органолептичним та фізико-хімічним показниками.

Досліджували мед ботанічного різного походження а саме гречаний, соняшниковий, квітковий та липовий, що був придбаний у приватних пасічників Бориспільського району Київської області. Для визначення органолептичних та фізико-хімічних показників використовували стандартизовані методи дослідження: масову частку води визначали на рефрактометрі ATAGO – PAL 22S, діастазне число меду за стандартизованим методом зазначеним у ДСТУ 4497:2005 «Мед натуральний. Технічні вимоги» [12, с. 22], рН в меді визначали за допомогою Seven Compact pH meter S220. Визначення вмісту цукрів проводилось на високоефективному рідинному хроматографі

з використанням рефрактометричного детектору Agilent Technologies 1200 Series.

**Виклад основного матеріалу.** Органолептичні показники – це властивості продукту, які можна оцінити за допомогою органів чуття (зір, нюх, смак, дотик). Для меду, ці показники включають колір, аромат, смак, консистенцію та кристалізацію. Кожен вид меду має свої характеристики, що залежать від використовуваних рослин, клімату, ґрунту та інших факторів [13, с. 135].

Завдяки органолептичній оцінці меду можна зрозуміти, які характеристики меду є для споживачів більш привабливими, а також визначити, які види меду можуть мати більшу цінність для споживачів.

Основою сенсорної оцінки меду є опис і кількісна оцінка різноманітних факторів, що стосуються сприйняття зорових, нюхових, смакових і тактильних характеристик [14, с. 77]. Крім того, сенсорний аналіз меду може надати інформацію щодо ботанічного походження меду та виявлення будь-яких потенційних фальсифікацій. Це також важливий процес у покращенні розуміння споживчих вимог, уподобань або відрази до оцінюваних медових продуктів [15, с. 26].

Результати досліджень з органолептичних показників меду різного походження наведені в таблиці 1.

З результатів дослідження встановлено, що мед гречаний має темно-коричневий колір, приємний аромат та смак без сторонніх присмаків, в'язку консистенцію. Мед соняшниковий має золотисто-жовтий колір, яскравий та ніжний аромат, солодкий смак без сторонніх присмаків, в'язку консистенцію. Мед липовий має блідо-жовтий колір, приємний та ніжний аромат, солодкий смак без сторонніх присмаків, в'язку консистенцію. Мед квітковий має світло-коричневий колір, приємний аромат та смак без сторонніх присмаків, солодкий та терпкий, в'язку консистенцію. Згідно

з отриманих результатів можна зробити висновок, що отримані результати органолептичної оцінки повністю відповідають ДСТУ 4497:2005 «Мед натуральний. Технічні Умови».

Наступним етапом досліджень було визначення фізико-хімічних показників меду. Результати дослідження по визначенню фізико-хімічних показників меду представлені на рис. 1.

За результатами досліджень, були встановлені основні параметри якості меду різних видів. Масова частка води у меді гречаного складає 19,4%, у соняшникового – 18,5%, у квіткового – 20%, а у липового – 20,5%. Масова частка сахарози у меді гречаного складає 5,5%, у соняшникового – 4,5%, у квіткового – 8%, а у липового – 3,5%. Дослідження рН, як величини допоміжної оцінки якості продукту, і як параметру для оцінки загальної кислотності, показали, що зразки відрізняються в залежності від типу меду: у гречаного меду показник складає 4, у соняшникового – 3,9, у квіткового – 20, а у липового – 4,3.

Суттєві відмінності показали результати дослідження діастазного числа досліджуваних зразків, як одного із найважливіших ферментів, що обумовлюється його біологічною активністю, та залежить від його ботанічного походження та рядом інших природних впливів.

**Висновки.** Встановлено, що всі дослідні зразки меду (гречаний, соняшниковий, квітковий та липовий) відповідають вимогам ДСТУ 4497:2005 «Мед натуральний. Технічні умови» і мають високу якість. Показники масової частки води, сахарози та показників рН для різних видів меду відрізняються, але такі відмінності є в межах норми і очікуваними для меду різних видів. Узагальнюючи, результати досліджень свідчать про високу якість та відповідність меду технічним вимогам, а також про його відмінні властивості та склад, що відповідають нормативним вимогам і вказує на відсутність фальсифікації.

Таблиця 1

Показники органолептичних показників меду різного походження

Найменування показника	Вид меду			
	Гречаний	Соняшниковий	Липовий	Квітковий
Колір	Темно-коричневий	Золотисто-жовтий	Блідо-жовтий	Світло-коричневий
Аромат	Без сторонніх запахів, приємний	Без сторонніх запахів, яскравий	Без сторонніх запахів, яскравий, ніжний	Без сторонніх запахів, приємний, ніжний
Смак	Без сторонніх присмаків, приємний	Без сторонніх присмаків, приємний, солодкий	Без сторонніх присмаків, приємний, солодкий, ніжний	Без сторонніх присмаків, солодкий, терпкий
Консистенція	В'язка	В'язка	В'язка	В'язка
Кристалізація	Присутня	Присутня	Присутня	Присутня

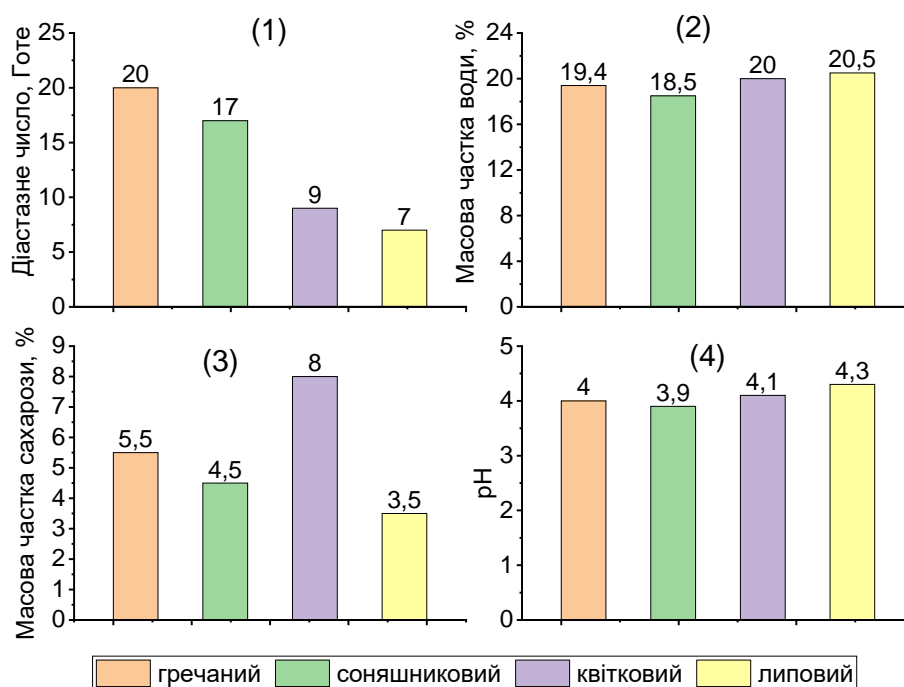


Рис. 1. Фізико-хімічні показники меду: 1 – діастазне числа Готе, 2 – масова частка води, 3 – масова частка сахарози, 4 – pH

#### Список літератури:

1. Missio da Silva, P.; Gauche, C.; Gonzaga, L.V.; Costa, A.C.O.; Fett, R. Honey: Chemical composition, stability and authenticity. *Food Chem.* 2016, 196, 309–323. .
2. Ghramh, H.A.; Khan, K.A.; Ahmed, Z.; Ansari, M.J. Quality evaluation of Saudi honey harvested from the Asir province by using high-performance liquid chromatography (HPLC). *Saudi J. Biol. Sci.* 2020, 27, 2097–2105.
3. Jaafar, M. B., Othman, M. B., Yaacob, M., Talip, B. A., Ilyas, M. A., Ngajikin, N. H., & Fauzi, N. A. M. A review on honey adulteration and the available detection approaches. *International Journal of Integrated Engineering*, 2020. 12(2), 125-131.
4. Sotiropoulou, N. S., Xagoraris, M., Revelou, P. K., Kaparakou, E., Kanakis, C., Pappas, C., & Tarantilis, P. The use of SPME-GC-MS IR and Raman techniques for botanical and geographical authentication and detection of adulteration of honey. *Foods*, 2021. 10(7), 1671.
5. Soares, S., Amaral, J. S., Oliveira, M. B. P., & Mafra, I. A comprehensive review on the main honey authentication issues: Production and origin. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017. 16(5), 1072-1100.
6. Megherbi, M., Herbreteau, B., Faure, R., Salvador, A. Polysaccharides as a marker for detection of corn sugar syrup addition in honey. *J. Agric. Food Chem.*, 2009. 57: 2105–2111. <https://doi.org/10.1021/jf803384q>
7. Devi, A., Jangir, J., & Anu-Appaiah, K. A. Chemical characterization complemented with chemometrics for the botanical origin identification of unifloral and multifloral honeys from India. *Food Research International*, 2018. 107, 216-226.
8. Methods of analysis of honey (Métodos analíticos en mieles) Ana Pascual-Maté, Sandra M Osés, Miguel A Fernández-Muiño & M Teresa Sancho // *Journal of Apicultural Research*. 2018. Vol. 57. – I. 1. – P. 38–740.
9. Maria, J., Sousa, B. De, Leite, E., Souza, D., Marques, G., & Magnani, M. Sugar profile, physicochemical and sensory aspects of monofloral honeys produced by different stingless bee species in Brazilian semi-arid region. *LWT-Food Science and Technology*, 2016. 65, 645–651.
10. Nascimento, A., Marchini, L., Carvalho, C., Araújo, D., Olinda, R., & Silveira, T. Physical-chemical parameters of honey of stingless bee (Hymenoptera: Apidae). *American Chemical Science Journal*, 2015. 7(3), 139–149.
11. Rajalakshmi, G., Gopal, A., Kumar, A., & Dinesh Kumar, A. Identification of moisture, glucose, sucrose, fructose region in honey sample using NIR spectroscopy. In *Proceedings of 2017 3rd IEEE International Conference on Sensing, Signal Processing and Security, ICSSS 2017*, 389–391.
12. Мед натуральний. Технічні вимоги: ДСТУ 4497:2005. – [Чинний від 28-01-2005]. – К.: Держспожив-стандарт України, 2007. – 4 с. – (Національні стандарти України).

13. Zlatev, Z. L. A. T. I. N., Taneva, I., Baycheva, S., & Petev, M. (2018). A comparative analysis of physico-chemical indicators and sensory characteristics of yogurt with added honey and bee pollen. *Bulg. J. Agric. Sci.*, 24, 132-144.

14. Gian Luigi Marcazzan; Carla Mucignat-Caretta; Carla Marina Marchese; Maria Lucia Piana; A review of methods for honey sensory analysis. *Journal of Apicultural Research* 2017, 57, 75-87, 10.1080/00218839.2017.1357940.

15. Maria Lucia Piana; Livia Persano Oddo; Antonio Bentabol; Etienne Bruneau; Stefan Bogdanov; Christine Guyot Declerck; Sensory analysis applied to honey: state of the art. *Apidologie* 2004, 35, S26-S37, 10.1051/apido:2004048.

**Svyatnenko R.S., Marynin A.I., Shevchenko O.Yu., Poznyak O.M., Litvynchuk S.I.**  
**PHYSICO-CHEMICAL AND ORGANOLEPTIC INDICATORS OF HONEY**  
**FROM DIFFERENT BOTANICAL AND ONE REGIONAL ORIGIN**

*The article presents a study on the quality of honey from different origins based on organoleptic and physico-chemical indicators. The research included honey of various types, including buckwheat, sunflower, floral, and lime honey from the Boryspil district of the Kyiv region. Standardized research methods were used to determine the organoleptic and physico-chemical indicators.*

*The results of the study indicate that the quality parameters of the honey meet the requirements of DSTU 4497:2005 "Natural Honey. Technical Requirements." The organoleptic evaluation of the honey was conducted based on its color, aroma, taste, and consistency. Buckwheat honey had a dark brown color, pleasant aroma, and taste without any off-flavors, and a thick consistency. Sunflower honey had a golden-yellow color, bright and delicate aroma, sweet taste without any off-flavors, and a thick consistency. Lime honey had a pale yellow color, pleasant and delicate aroma, sweet taste without any off-flavors, and a thick consistency. Floral honey had a light brown color, pleasant aroma and taste without any off-flavors, sweet and slightly bitter, and a thick consistency.*

*The physico-chemical parameters of the honey were determined using standardized research methods. The moisture content in buckwheat honey was 19.4%, in sunflower honey – 18.5%, in floral honey – 20%, and in lime honey – 20.5%. The sucrose content in buckwheat honey was 5.5%, in sunflower honey – 4.5%, in floral honey – 8%, and in lime honey – 3.5%. The pH values of the honey also varied depending on the honey type. The pH of buckwheat honey was 4, sunflower honey – 3.9, floral honey – 20, and lime honey – 4.3.*

*Based on the results of the conducted research, it can be concluded that the quality of the honey meets the established norms and standards, and its quality is high.*

**Key words:** honey, organoleptic indicators, physico-chemical indicators, botanical origin of honey.



# ТРАНСПОРТ

УДК 656.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/20>**Аринушкіна Н.С.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Грищенко Т.М.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ УКРАЇНИ

Забезпечення безпеки дорожнього руху в Україні залишається актуальним завданням, що вимагає активних дій щодо попередження дорожньо-транспортних пригод (ДТП), зниження аварійності та зменшення тяжкості наслідків, а особливо зменшення їх кількості із летальними наслідками до мінімуму. Вирішення даного питання можливе за рахунок посилення міжвідомчої взаємодії, комплексної дії на проблеми у сфері забезпечення безпеки дорожнього руху, реалізації у кожному з напрямів діяльності заходів системного характеру. Особливої ваги набуває скоординована робота всіх зацікавлених відомств і служб [1].

У статті виконаний аналіз кількості ДТП, який показав, що загальна їх кількість кожного року збільшується на 1–2 % та залишається значний рівень з постраждалими та загиблими.

Дослідження показують, що однією з основних умов забезпечення безпеки руху – є дисципліна керування автомобілем. Вибираючи режим руху необхідно враховувати час доби, погоду, конструктивні особливості автомобіля, дорожні умови і строго дотримуватися правил дорожнього руху та встановлених дорожніх знаків [2].

Незважаючи на те, що з вини водія відбувається переважна кількість ДТП, велику роль у забезпеченні безпеки руху відіграють технічний рівень та експлуатаційний стан доріг, до яких входять: геометричні розміри земляного полотна, ширину та стан узбіч, рівність, шорсткість та коефіцієнт зчеплення колеса з покриттям, видимість на кривих в плані та поздовжньому профілі, освітленість ділянки дороги у нічний час доби, наявність розмітки на проїзній частині, якість інженерного устаткування, наявність засобів регулювання дорожнього руху у відповідності з фактичною інтенсивністю руху, тобто вплив дорожніх умов на безпеку руху закладається на етапі проектування доріг, а реалізується в процесі експлуатації [3, 4].

Забезпечення безпеки дорожнього руху, головний критерій при нормуванні вимог до елементів плану та поздовжнього профілю автомобільних доріг а також при призначенні заходів, які проводяться дорожньо-експлуатаційною службою (ДЕС) для збереження потрібних транспортно-експлуатаційних якостей дороги в погодних умовах що змінюються.

Наведена структурна система служби безпеки дорожнього руху (СБДР) представляє собою певний порядок розміщення, підпорядкування та взаємозв'язок окремих підсистем та елементів доріг, транспорту, служб які забезпечують високоефективний перевізний процес з урахуванням функціонального стану водія.

При гармонійній роботі блоків СБДР будуть вирішуватися питання підвищення безпеки руху, та зниження кількості ДТП.

Відмова хоча б однієї ланки системи СБДР призводить до відмови функціонування всієї системи. Результатом відмови елементів даної системи та її міжелементних зв'язків являється велика вірогідність травмувань та загибелі людей.

**Ключові слова:** безпека дорожнього руху, автомобільна дорога, дорожньо- транспортна пригода, дорожні умови, дорожньо-експлуатаційна служба.

**Постановка проблеми.** Згідно звітів міжнародних інституцій рівень організації безпеки дорожнього руху в Україні залишається вкрай низьким, тому у державі постає завдання зниження смертності на дорогах на 50 відсотків до 2030 року [1, 2].

Аналіз статистичних даних кількості ДТП за період з 2018 по 2021 рік показав зростання їх загальної кількості приблизно на 1–2 % кожного року.

В Україні спостерігається велика кількість ДТП з загиблими та постраждалими, які за роками розподіляються наступним чином: 2019 рік – 26052 ДТП з постраждалими, 32736 – травмованих, 3454 – загиблих; 2020 рік – 26140 ДТП з постраждалими, 31974 – травмованих, 3541 – загиблих; 2021 рік – 24521 ДТП з постраждалими, 29738 – травмованих, 3238 – загиблих; 2022 рік – 18 628 ДТП з постраждалими, 23196 – травмованих, 2786 – загиблих [5].

Велика кількість транспортних засобів є невід’ємною частиною економіки країн, але водночас транспортні засоби представляють небезпеку життю людини. Лідери багатьох держав світу об’єднують свої зусилля для зменшення кількості постраждалих та травмованих внаслідок дорожньо-транспортних пригод. Міжнародне співтовариство приділяє значну увагу розробці та здійсненню практичних заходів з безпеки дорожнього руху, спрямованих на запобігання дорожньо-транспортного травматизму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Висока ефективність функціонування дорожньо-транспортної системи з перевезення вантажів та пасажирів на дорогах загального користування, у містах та населених пунктах досягається у тому випадку, коли весь комплекс перевізного процесу (транспорт, дороги та споруди, організація та безпека руху, різні служби) підпорядковуються певному порядку, складові якого взаємопов’язані між собою і координуються з центрального органу.

Аварійність на автомобільному транспорті завдає значних збитків економіці країни. Економічні збитки від ДТП складаються з прямих та непрямих збитків. До прямих належать збитки авто-транспортних підприємств; служби експлуатації доріг та вантажовідправників; затрати патрульної поліції та юридичних органів на розслідування ДТП; медичних закладів на лікування потерпілих; підприємств, співробітники яких стали жертвами ДТП (оплата бюлетенів, надання матеріальної допомоги); державних органів соціального забезпечення (пенсії, компенсації за страхуванням).

До непрямих збитків належать, збитки народного господарства через тимчасове або повне вибуття члена суспільства зі сфери матеріального виробництва, порушення виробничих зв’язків і соціально-моральні втрати.

Сумарні збитки через одну ДТП складаються із затрат на переміщення, відновлення та ремонт пошкоджених транспортних засобів; втрат через простої транспортних засобів з моменту ДТП до відновлення; затрат на ремонт пошкоджених автомобільних доріг і споруд; збитків від псування вантажів у результаті ДТП; затрат, пов’язаних із порушенням руху у зоні ДТП і з подальшим очищенням проїзної частини; збитків через втягування людини в ДТП; затрат органів патрульної служби та юридичних органів на розслідування, оформлення матеріалів що стосуються ДТП, розгляд справи в суді.

З поліпшенням роботи автомобільних доріг зростає продуктивність автомобілів, зменшуються собівартість перевезень та збитки від ДТП.

Щоб підвищити ефективність організації перевезень, потрібно комплексно вивчати процеси взаємодії елементів дорожньо-транспортної системи (ДТС).

Питання вивчення дорожньо-транспортної системи відображені в роботах вітчизняних та зарубіжних вчених [6, 7].

Розв’язання проблеми здійснюється із застосуванням обґрунтованих цільових показників шляхом впровадження сучасних вимог і технологій, які системно охоплюють усі ключові аспекти безпеки дорожнього руху, шляхом вдосконалення даної системи.

**Формулювання цілей статті.** Для підвищення безпеки дорожнього руху необхідне вдосконалення управління безпекою дорожнього руху та координація робіт, тому службу підвищення безпеки дорожнього руху необхідно об’єднати в єдину державну систему України, в якій мають бути керуюча та керована системи (СБДР – служба безпеки дорожнього руху).

**Виклад основного матеріалу.** На основі принципів системотехніки стосовно безпеки дорожнього руху структурну схему СБДР можна представити, такою, що складається з двох основних блоків функціонально взаємопов’язаних між собою: керуючою та керованою системами (рис. 1).

Лініями 1 – 20 позначені зв’язки між елементами керованої системи.

Лініями 21,22 – позначений зв’язок між керуючою та керованою системами.

Керована система (I) складається з п’яти блоків і включає основний блок – «проблема підвищення безпеки руху». На цю проблему працює блок «наука», який виконує комплекс наукових досліджень щодо підвищення безпеки руху, блок дорожньо-експлуатаційної служби (ДЕС), патрульної поліції (ПП), транспортної служби (ТС). Блок ДЕС пов’язаний із блоком «проблема безпеки руху», а також із блоком «наука», ПП та ТС.

На безпеку руху значно впливає дорожньо-експлуатаційна служба.

Дорожні умови значно впливають на режим і безпеку руху, як окремих автомобілів, так

і всього потоку транспортних засобів. Велика роль у забезпеченні безпеки руху належить основним техніко-експлуатаційним показникам автомобільних доріг, до яких зокрема відносяться рівність і шорсткість дорожнього покриття.

Кліматичні та метеорологічні фактори впливу на дорогу, руйнівна дія транспортних засобів – носять тимчасовий характер та погіршують стан автомобільної дороги як інженерної споруди, знижуючи тим самим ефективність та безпеку дорожнього руху.

Погодно-кліматичні чинники тривалого впливу (сніговий покрив, низькі температури) значно впливають на пропускну здатність дороги, середню швидкість руху та ін. Фактори короткочасної дії (опаді, туман, ожеледиця) поширюються, як правило, на окремі ділянки доріг, призводячи до локального зниження швидкостей руху і збільшення кількості ДТП.

Серйозним і важливим завданням підвищення безпеки руху є усунення слизькості покриття. Шорсткість покриття в процесі експлуатації знижується внаслідок стирання кам'яних матеріалів під дією шин транспортних засобів, в результаті цього зростає гальмівний шлях, збільшується ймовірність ДТП.

Зниження коефіцієнта зчеплення відбувається також в результаті дії атмосферних опадів, забруднення та температурного розм'якшення асфальто-бетонного покриття.

Варто зазначити, що важливим чинником для забезпечення безпеки дорожнього руху є стан проїзної частини. Одним з найбільших серйозних наслідків незадовільного стану проїзної частини автомобільної дороги є ймовірність виникнення ДТП. До основних причин, з яких виникають ДТП,

можна віднести наступні незадовільні умови руху: слизьке покриття, відсутність дорожньої розмітки, дорожніх знаків, огорожі, тротуарів, пішохідних доріжок, незадовільний стан покриття та узбіччя, недостатнє освітлення, конструктивні дефекти автомобільної дороги [8]. Відомо, що незадовільний стан дорожнього покриття негативно впливає на водія та призводить до приймання не вірних рішень при керуванні транспортним засобом.

Нерівності покриття являються причиною 13–18 % ДТП, пов'язаних з несприятливими дорожніми умовами. Причина виникнення ДТП полягає у необхідності непередбачуваної зміни швидкісного режиму (екстремне гальмування), маневру в плані або одночасного здійснення цих двох дій. При наявності попутного та зустрічного транспортних потоків вірогідність зіткнення у таких випадках різко зростає. Окрім того, нерівності викликають коливання підвіски, що може призвести до втрати керування. Коливання причепів та напівпричепів автопоїздів призводить до збільшення динамічного коридору руху, що також збільшує вірогідність зіткнення та можливість втрати бокової стійкості. Наявність нерівностей на дорогах підвищує втомлюваність водіїв, відволікає їх увагу від сприйняття інших об'єктів на дорозі, знижує перепускальну здатність дороги та у підсумку зменшує продуктивність рухомого складу [9, 10, 11].

Наявність вибоїн та руйнувань на дорожньому покритті являються основними причинами виникнення ДТП.

Офіційна статистика відносить до дорожньо-транспортних пригод, викликаних незадовільними дорожніми умовами, порівняно невеликий

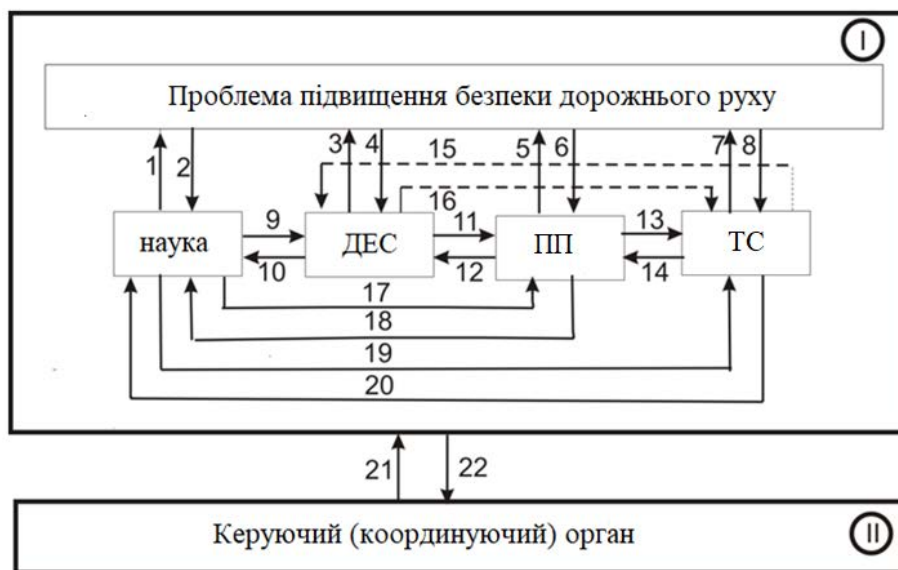


Рис. 1. Структурна схема СБДР – підвищення безпеки дорожнього руху на автомобільних дорогах

відсоток ДТП, вважаючи, що переважна кількість пригод виникає внаслідок неправильних дій водіїв [3, 4]. Глибокий аналіз обставин виникнення дорожньо-транспортних пригод показує, що в багатьох з них виявлявся супутній вплив дороги, що ускладнив керування автомобілем або призвів до помилки водіїв.

В структурній схемі кожен блок пов'язаний із проблемою підвищення безпеки дорожнього руху прямим та зворотнім зв'язком для отримання відомостей про результати впровадження розроблених заходів. Крім того, кожен з чотирьох блоків пов'язані між собою для координації спільних зусиль на підвищення безпеки руху.

Такі зв'язки дозволяють дорожньо-експлуатаційній службі визначати необхідний рівень споживчих властивостей автомобільних доріг та міських вулиць, необхідний рівень їх транспортно-експлуатаційних показників якості, що зрештою визначає їх транспортно-експлуатаційний стан [12].

Блок ПП пов'язаний із блоками «проблема безпеки руху», а також із блоком «наука», ДЕС та ТС. Цей блок забезпечує д'отримання організаціями, посадовими особами та всіма учасниками дорожнього руху законодавства України, інших нормативних правових актів, правил, стандартів та технічних норм з питань забезпечення безпеки дорожнього руху, проведення заходів щодо попередження дорожньо-транспортних пригод та зниження тяжкості їх наслідків з метою охорони життя, здоров'я та майна громадян, захисту їх прав та законних інтересів, а також інтересів суспільства та держави.

Блок ТС пов'язаний із блоком «проблема безпеки руху», а також з блоками «наука», ДЕС та ПП. До цього блоку пред'являють основні вимоги щодо забезпечення безпеки дорожнього руху під час виготовлення та реалізації транспортних засобів, їх складових частин, предметів додаткового обладнання, запасних частин та приладдя, а також проводять удосконалення конструктивних рішень, технічних засобів та заходів, що попереджають виникнення ДТП, а також удосконалюють конструкції та технічні засоби, що знижують тяжкість дорожньо-транспортних пригод.

Останнім часом з'являються спроби поєднати роботу систем активної і пасивної безпеки автомобіля, та створити так звані превентивні системи.

Превентивна система безпеки автомобіля (ПСБА) або ж система попередження зіткнення

призначена для допомоги водію оцінити дорожню ситуацію, виявити джерела небезпеки та здійснити відповідні маневри з метою повного виключення ДТП або зменшення її наслідків.

В залежності від конструкції превентивна система може здійснювати:

- попередження водія про небезпеку зіткнення;
- підготовку гальмівної системи до екстреного гальмування;
- активацію окремих пристроїв пасивної безпеки;
- часткове або повне автоматичне гальмування.

Керуюча система (II) включає координуючий орган, спрямований на координацію дій у керованій системі підвищення безпеки руху. Цей орган має бути при Кабінеті Міністрів України, який координує та займається науковими дослідженнями, а також спрямовує функціонування дорожньо-експлуатаційної служби, патрульної поліції та транспортної служби на підвищення безпеки руху з перевезення вантажів та пасажирів.

**Висновки.** Для вирішення проблеми підвищення безпеки руху на автомобільних дорогах необхідний комплексний підхід із залученням великої кількості фахівців різних галузей науки та техніки.

Безпека руху на дорогах може бути досягнута лише за умови одночасного проведення комплексу заходів:

- вдосконалення конструкції автомобілів та інших транспортних засобів, утримання транспортних засобів у належному технічному стані;
- суворого дотримання водіями та пішоходами не тільки правил дорожнього руху, а й високої культури водіння та взаємної поваги;
- забезпечення необхідних елементів як плану, так і поздовжнього профілю доріг, які дають можливість автомобілям рухатися з високими швидкостями;
- підтримка дорожньо-експлуатаційною службою високих транспортних якостей доріг шляхом забезпечення необхідної міцності, рівності, коефіцієнта зчеплення та необхідних відстаней видимості;
- належного інформування водіїв про дорожні умови та правильний режим руху шляхом встановлення дорожніх знаків, надання маршрутних дорожніх схем та карт.

Підвищення безпеки дорожнього руху потребує великого обсягу досліджень на основі системного підходу до даного питання.

#### Список літератури:

1. Стратегія підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.10. 2020 р. №1360-р. *Урядовий кур'єр*. 2020. 04 лист. (214).
2. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80> (дата звернення: 20.04.2023).

3. Вознюк А.Б., Нагребельна Л.П., Міненко Є.В. Недоліки в дорожніх умовах та їх вплив на виникнення дорожньо-транспортних пригод. *Дороги і мости*. Київ, 2019. Вип. 19-20. С. 163-172.
4. Поліщук В. П., Нагребельна Л. П. Аналіз факторів, що спричиняють ДТП на автомобільних дорогах загального користування та пропозиції по їх ліквідації. *Дороги і мости*. Київ, 2016. Вип. 16. С. 82-85.
5. Статистика ДТП в Україні. URL : <http://patrol.police.gov.ua/statystyka/> (дата звернення: 20.04.2023).
6. Прусенко Є.Д. Постійні пристрої на автомобільному транспорті: навч. посіб. Київ: ІСДО, 1994. 216 с.
7. Систематологія на транспорті. Організація дорожнього руху. / Гаврилов Е.В та ін. / Київ: Знання України, 2007. 452 с.
8. Бойків М.В., Житенко О.В., Діхтяр О.В. Аналіз причин виникнення дорожньо-транспортних подій в Україні. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Будівництво*. Київ. 2018. Видавничий дім «Гельветика». Том 29 (68). № 2. С. 290-294.
9. Кашканов А.А., Кашканов В.А., Кужель В.П. Транспортно-експлуатаційні якості автомобільних доріг та міських вулиць: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2017. 113 с.
10. Основи експлуатації автомобільних доріг і аеродромів: навч. посібник / В.С. Степура, А.О. Белятинський, Н.В. Кужель. Київ.: НАУ, 2013. 204 с.
11. Постранський Т.М., Жук М.М. Дослідження впливу нерівностей проїзної частини на показники функціонального стану водія. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 4. С. 109.
12. СОУ 45.2-00018112-077:2012. Автомобільні дороги. Споживчі властивості автомобільних доріг загального користування. [Чинний від 20.02.2012]. Київ, 2012. 49 с.

### **Arinushkina N.S., Hryshchenko T.M. THE TRAFFIC SAFETY IMPROVEMENT ON THE ROADS OF UKRAINE**

*Ensuring road safety in Ukraine remains an urgent task that requires active actions to prevent traffic accidents (traffic accidents), reduce accidents and reduce the severity of consequences, and especially reduce their number with fatalities to a minimum. The solution to this issue is possible due to the strengthening of interdepartmental interaction, comprehensive action on problems in the field of road safety, implementation of systemic measures in each of the areas of activity. Of particular importance is the coordinated work of all interested departments and services [1].*

*The article analyzes the number of road accidents, which showed that their total number increases by 1–2 % every year; but a significant level of injured and dead remains.*

*Research shows that one of the main conditions for ensuring traffic safety is driving discipline. When choosing a driving mode, it is necessary to take into account the time of day, the weather; the design features of the car, road conditions and strictly follow the rules of the road and established road signs [2].*

*Despite the fact that the majority of road accidents are caused by the fault of the driver, the technical level and operational condition of the roads play an important role in ensuring traffic safety. They include: the geometric dimensions of the ground surface, the width and condition of the shoulders, the evenness, roughness and the coefficient of adhesion of the wheel to the surface, visibility on curves in the plan and longitudinal profile, the illumination of the road section at night, the presence of markings on the carriageway, the quality of engineering equipment, availability of means of traffic regulation in accordance with the actual traffic intensity. Therefore, the influence of road conditions on traffic safety is established at the stage of road design, and is realized during operation [3, 4].*

*Ensuring road traffic safety is the main criterion when standardizing the requirements for the elements of the plan and longitudinal profile of highways, as well as when prescribing measures that are carried out by the road maintenance service (DES) to maintain the necessary transport and maintenance qualities of the road in changing weather conditions.*

*The given structural system of the traffic safety service (SBDR) represents a certain order of placement, subordination and interconnection of individual subsystems and elements of roads, transport, and services that ensure a highly efficient transportation process taking into account the functional state of the driver.*

*With the harmonious operation of the SBDR blocks, issues of increasing traffic safety and reducing the number of road accidents will be resolved.*

*The failure of at least one link of the SBDR system leads to the failure of the entire system. The result of the failure of the elements of this system and its inter-element connections is a high probability of injury and death of people.*

**Key words:** traffic safety, road, traffic accident, road conditions, road maintenance service.

**Ватуля Г.Л.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ОБШИВКИ ДАХУ ВАГОНА-ХОПЕРА ІЗ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

У статті наведено результати дослідження міцності обшивки даху вагона-хопера для перевезень зерна. При цьому для зменшення його тари та можливого збільшення вантажопідйомності запропоновано впровадження у якості обшивки даху композиційного матеріалу. Дослідження проведено на прикладі даху вагона-хопера моделі 19-7016. Оскільки каркас даху виготовлено зі сталі, яка є ізотропним матеріалом, а обшивка – із композиту, який має ортотропні властивості, то розрахунок обшивки на міцність здійснено окремо від каркасу. При цьому використано метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Розрахунок проведено за критерієм максимальних напружень. До уваги прийнято основні схеми навантажень даху в експлуатації: дія вертикальних сил на дах; дія двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної; дія снігового навантаження; дія зовнішнього тиску у 30 кПа.

При складанні скінчено-елементної моделі застосовані тетраедри. Закріплення обшивки здійснювалось в зонах її прилягання до каркасу за периметром, а також в зонах обтирання на підкладні листи.

Результати розрахунків показали, що міцність даху при всіх розглянутих схемах навантажень забезпечується. Максимальні напруження в обшивці виникають при дії на неї зовнішнього тиску у 30 кПа і складають 104,4 МПа, що нижче за допустимі.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій залізничних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

**Ключові слова:** транспортна механіка, дах вагона-хопера, навантаженість даху, міцність даху, напружений стан даху.

**Вступ.** Перспективи розвитку економіки євразійських країн зумовлюють підвищення ефективності експлуатації транспортної галузі. Одним із найбільш поширених типів вантажів, які експортуються з України у країни Європи є зернові. Для їх перевезень залізницею використовуються вагони-хопери (рис. 1 [1]).

Для підвищення ефективності експлуатації вагонів-хоперів в сучасних умовах конкурентної боротьби на ринку перевізних послуг, важливим є покращення їх техніко-економічних показників. Досягти цього можливо шляхом зменшення тари вагона-хопера. Це сприятиме можливості підвищення вантажопідйомності вагона, а відповідно



а)



б)

Рис. 1. Вагони-хопери для перевезень зерна а) модель 19-7053; б) модель 19-7016

і підвищенню ефективності експлуатації. Тому дослідження присвячені покращенню техніко-економічних показників вагона-хопера є актуальними.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Зменшення тари вагона-хопера можливо досягти, наприклад, удосконаленням конструкції його даху. Питання удосконалень дахів вагонів висвітлюються в чималій кількості наукових публікацій. Так, наприклад, для зменшення тари критого вагона в роботі [2] запропоновано виготовлення обшивки його даху із композиційного матеріалу. Проведено визначення основних показників динаміки критого вагона з урахуванням зменшення його тари. Однак, необхідно сказати, що авторами не проводилося визначення міцності даху критого вагона з урахуванням запропонованого удосконалення.

В роботі [3] проводиться визначення міцності удосконаленої несучої конструкції вантажного вагона при основних експлуатаційних режимах навантаження. Встановлено, що показники міцності несучої конструкції вагона, в тому числі і даху, знаходяться в межах допустимих. Разом з цим авторами не враховано навантажень, які окремо діють на дах в експлуатації.

Оцінка напруженого стану даху залізничного вагона висвітлюється в роботі [4]. Дослідження проведено на прикладі вагона-рефрижератора. Авторами роботи приділено увагу питанням визначення стійкості даху при експлуатаційних навантаженнях, а також впливу на нього вібрацій. Разом з цим, розрахунок проведено з використанням європейських стандартів, які властиві для вагонів колії 1435 мм. Тобто визначення навантаженості даху при експлуатації його на вагонах колії 1520 мм авторами не проводилося.

Для підвищення ефективності експлуатації напіввагонів у роботі [5] запропоновано конструкцію зйомного даху з телескопічними консольними частинами. Таке рішення дозволяє його використання на напіввагонах різних моделей. Наведено обґрунтування конструкційних особливостей

даху, а також результати його розрахунку на міцність. Разом з цим, при розрахунку на міцність даху автори обмежилися основними схемами його навантажень у експлуатації.

Особливості визначення міцності даху залізничного вагона розглянуто у роботі [6]. Авторами досліджено падіння вантажу, у вигляді шматку бетону, на дах з висоти 3 м. Наведено порівняльний аналіз показників міцності даху із композиту та алюмінію. Важливо сказати, що дана задача є досить нетривіальною та не висвітлює режимів навантаження даху при основних експлуатаційних схемах.

Проведений аналіз літературних джерел доводить, що питання визначення міцності даху вагона-хопера є досить актуальними.

**Мета та основні завдання статті.** Метою статті є висвітлення особливостей визначення міцності обшивки даху вагона-хопера із композиційного матеріалу при основних експлуатаційних схемах навантажень. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- обґрунтувати доцільність використання композиційного матеріалу для виготовлення обшивки даху вагона-хопера;

- провести розрахунок на міцність обшивки даху вагона-хопера із композиційного матеріалу.

#### Викладення основного матеріалу статті.

Проведені у попередніх дослідженнях авторів розрахунки типової конструкції даху вагона-хопера дозволили зробити висновок, що його міцність при основних розрахункових режимах забезпечується, оскільки напруження, які виникають в ньому при жодній розрахунковій схемі не перевищують допустимі – 220 МПа [7]. Крім того, мається резерв міцності складових даху. Розрахунок реалізовано на прикладі даху вагона-хопера моделі 19-7016 (рис. 2).

Для зменшення тари вагона-хопера можливим є використання для його виготовлення матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями, які мають зменшену у порівнянні зі сталлю масу.



Рис. 2. Просторова модель даху а) вид зверху; б) вид знизу

Розрахунок реалізовано на прикладі композиту, який має фізико-механічні властивості, наведені в табл. 1 [8].

Таблиця 1

**Основні фізико-механічні властивості композиту**

Назва параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	$2,42 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуасона	0,394
Модуль зсуву, МПа	318,9
Масова щільність, кг/м <sup>3</sup>	2200
Межа міцності в напрямку волокон, МПа	1100–1300
Межа міцності в поперечному напрямку волокон, МПа	650

У відповідності до [7] товщину листів гладкої сталеві обшивки кузовів вагонів, якщо її не обумовлено у вхідних даних на проектування, рекомендовано приймати 1,5–2,0 мм. При цьому перше значення товщини (1,5 мм) стосується листів з корозійностійких сталей, а друге (2,0 мм) – листів з інших сталей.

У зв'язку з тим, що відомості про товщину обшивки у випадку її виготовлення із композиту відсутні, то на даному етапі дослідження її товщину прийнято рівною 1,5 мм. З урахуванням цього маса обшивки даху складає 351,19 кг. Тоді загальна маса даху вагона-хопера дорівнює 1361,17 кг, що на 22,33% менше маси типової конструкції. З використанням обшивки із композитного матеріалу для даху вагона його загальна тара зменшиться на 1,7% у порівнянні з прототипом.

Для визначення міцності обшивки даху із композиційного матеріалу проведено її розрахунок. Оскільки каркас даху виготовлено зі сталі, яка є ізотропним матеріалом, а обшивка – із композиту, який має ортотропні властивості, то розрахунок обшивки здійснено окремо від каркасу. При цьому закріплення обшивки здійснювалось в зонах її прилягання до каркасу за периметром, а також в зонах обпирання на підкладні листи (лапи). Для цього на ній встановлювалися накладки, площа яких ідентична до геометрії лап.

З урахуванням цього просторова модель обшивки має вигляд, наведений на рис. 3.

При проведенні розрахунку на міцність до уваги приймалися такі схеми навантажень даху [7]:

– дія вертикальних сил на дах, які обумовлені поєднанням сили ваги даху та вертикальної динамічної сили, яка визначається множенням сили ваги даху на коефіцієнт вертикальної динаміки (I схема навантаження);

– дія двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної в будь-якій частині даху (II схема навантаження);

– дія снігового навантаження (III схема навантаження);  
 – дія зовнішнього тиску у 30 кПа. При цьому коефіцієнт запасу стійкості даху повинен бути не менше ніж 1,1 (IV схема навантаження).

Розрахунок проведено за методом скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation [9–11]. При цьому застосовано критерій максимальних напружень.

При складанні скінчено-елементної моделі застосовані тетраедри. Кількість елементів скінчено-елементної моделі склала 304284, а вузлів – 96103. Максимальний розмір елемента становить 40 мм, а мінімальний – близько 13 мм.

Результати розрахунків наведено на рис. 4–11.

Результати проведених розрахунків доводять, що впровадження композитної обшивки даху вагона-хопера з точки зору зменшення його тари та забезпеченні умов міцності при основних експлуатаційних режимах навантажень є доцільним. Напруження, які виникають в ньому при всіх розглянутих схемах є значно нижчими за допустимі. Це обумовлено значною межею міцності розглянутого у якості прикладу, матеріалу.

**Висновки.**

1. Для зменшення тари вагона-хопера запропоновано виготовлення обшивки даху із композиційного матеріалу. Встановлено, що з урахуванням запропоновано рішення маса даху вагона-хопера зменшується на 22,33% за масу типової конструкції. З використанням обшивки із композитного

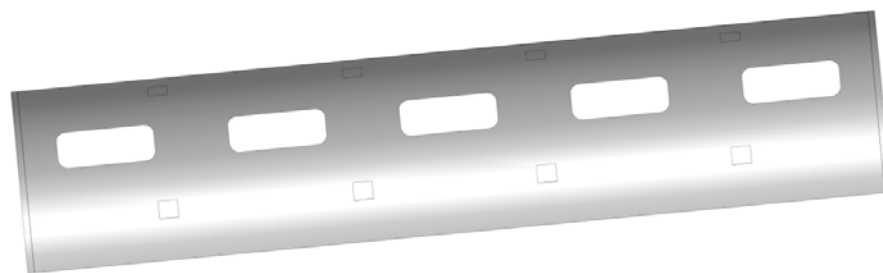


Рис. 3. Просторова модель обшивки даху



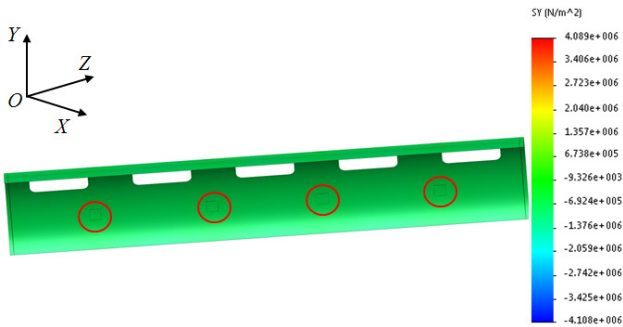


Рис. 4. Напружений стан обшивки даху (I схема навантаження)

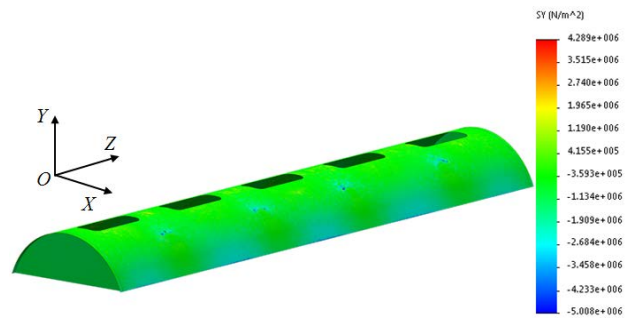


Рис. 8. Напружений стан обшивки даху (III схема навантаження)

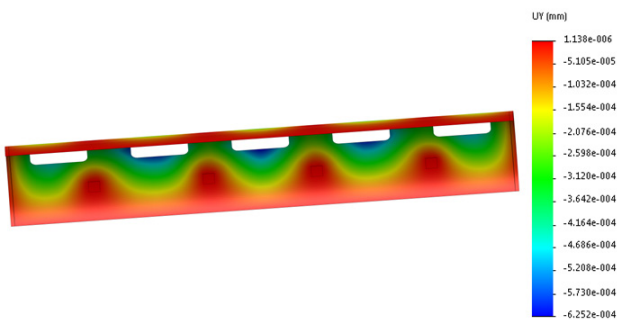


Рис. 5. Переміщення в обшивці даху (I схема навантаження)

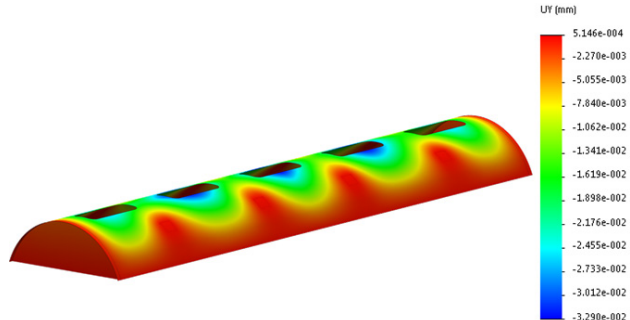


Рис. 9. Переміщення в обшивці даху (III схема навантаження)

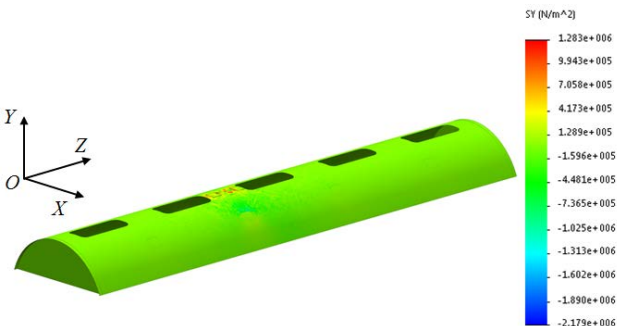


Рис. 6. Напружений стан обшивки даху (II схема навантаження)

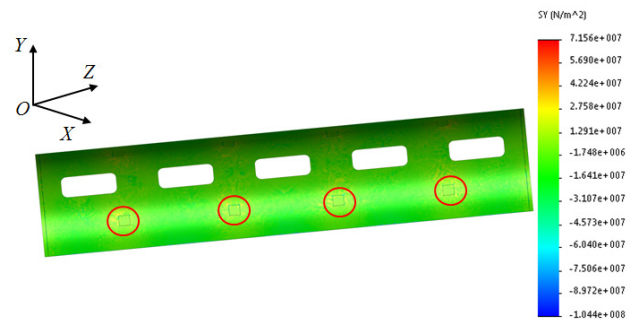


Рис. 10. Напружений стан обшивки даху (IV схема навантаження)

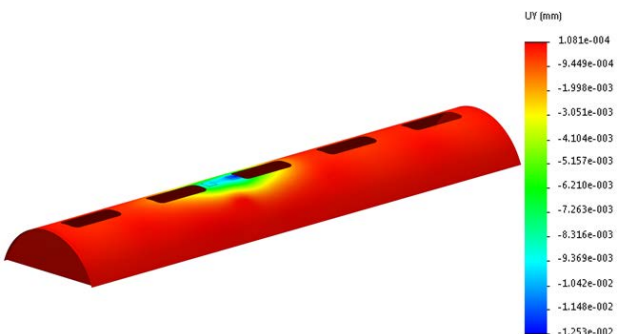


Рис. 7. Переміщення в обшивці даху (II схема навантаження)

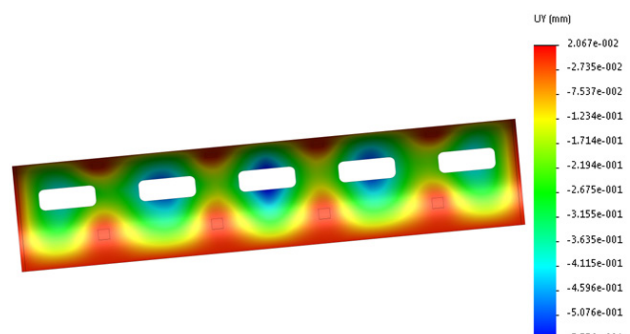


Рис. 11. Переміщення в обшивці даху (IV схема навантаження)

матеріалу для даху вагона його загальна тара зменшиться на 1,7% у порівнянні з прототипом.

2. Визначено міцність обшивки даху вагона-хопера при основних експлуатаційних режимах

навантаження. Встановлено, що міцність даху при всіх розглянутих схемах навантажень забезпечується. При цьому максимальні напруження в обшивці виникають при дії на неї зовнішнього

тиску у 30 кПа і складають 104,4 МПа, що нижче за допустимі.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій залізничних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

#### Подяка.

Дослідження, представлені в даній статті, виконані в рамках реалізації двостороннього гранто-

вого наукового проекту UK-Ukraine R&I twinning grants scheme. Проєкт реалізується сумісно Українським державним університетом залізничного транспорту та Університетом Західної Шотландії. Номер державної реєстрації проєкту в реєстрі Міжнародних науково-технічних програм, проєктів і грантів Державної наукової установи Український інститут науково-технічної експертизи та інформації – 0123U102700.

#### Список літератури:

1. ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод». URL: <https://www.kvsz.com/index.php/ua/produksiya/vantazhne-vagonobuduvannya/vagoni-khoperi> (дата звернення: 29.05.2023).
2. Фомін О. В., Ловська А. О., Фоміна А. М., Сергієнко О. В. Визначення вертикальної навантаженості критого вагона з дахом із композитного матеріалу // Наукові вісті Дніпровського університету. 2022. №23. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-16>
3. Chandra Prakash Shukla, Bharti P. K. Study and Analysis of Doors of BCNHL Wagons // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015. Vol. 4, Issue 04. P. 1195–1200. <https://doi.org/10.17577/ijertv4is041031>
4. Raffaele Sepe, Angela Pozzi. Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car // Frattura ed Integrità Strutturale. 2015. Vol. 33. P. 451 – 462. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.33.50>
5. Oleksij Fomin, Alyona Lovska. Justification of the Use of Square Pipes in the Frame of the Removable Roof of the Open Wagon // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. №4/7 (112). P. 18 – 25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237157>
6. J. Cuartero, A. Miravete, R. Sanz. Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash // International Journal of Crashworthiness. 2011. Vol. 16(1). P. 41 – 47. <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.501163>
7. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.
8. Фомін О. В., Ловська А. О., Фоміна А. М., Прокопенко П. М. Розрахунок міцності кришки люка напіввагона із полімерного композиційного матеріалу // Збірник наукових праць ДУПТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2022. – Вип. 39. – С. 143 – 152. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-14>
9. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(1). 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
10. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: Навчальний посібник. Херсон. 2018. 252 с.
11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник. Луцьк. 2018. 172 с.

#### Vatulia G.L., Lovska A.O. RESEARCH OF THE STRENGTH OF THE ROOF COVERING OF A HOPPER WAGON MADE OF COMPOSITE MATERIAL

*The article presents the results of a study of the strength of the roof covering of a hopper car for grain transportation. In order to reduce its tare and possibly increase its carrying capacity, it is proposed to introduce a composite material as a roof covering. The study was carried out on the example of the roof of a hopper car model 19-7016. Since the roof frame is made of steel, which is an isotropic material, and the lining is made of a composite with orthotropic properties, the strength calculation of the lining was performed separately from the frame. The finite element method was used, which is implemented in the SolidWorks Simulation software package. The calculation was performed according to the maximum stress criterion. The main schemes of roof loads in operation were taken into account: the effect of vertical forces on the roof; the effect of two forces of 1.0 kN each, distributed on a 0.25 m x 0.25 m area and applied at a distance of 0.5 m from each other; the effect of snow load; the effect of external pressure of 30 kPa.*

*Tetrahedrons are used when building a finite-element model. Fastening of the cladding was carried out in the areas of its adjacency to the frame around the perimeter, as well as in the areas of abutment on the supporting sheets.*

*The results of the calculations showed that the strength of the roof is ensured under all the considered loading schemes. The maximum stresses in the cladding occur when it is subjected to an external pressure of 30 kPa and amount to 104.4 MPa, which is lower than permissible.*

*The conducted research will contribute to the development of developments in the design of modern railroad car structures with improved technical and economic performance.*

**Key words:** transport mechanics, roof of a hopper car, roof load, roof strength, roof stress state.

UDC 621.313

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/22>**Doshchenko H.H.**

Kherson State Maritime Academy

**Nahovskyi D.A.**

Kherson State Maritime Academy

## MATHEMATICAL MODEL OF STEADY OPERATION OF SHIP ELECTRICAL COMPLEXES

Currently, existing control systems for parallel operation of diesel-generator units do not control the presence of power exchange fluctuations and do not limit their level. Research conducted earlier led to the discovery of the negative impact of power exchange fluctuations between parallel-working diesel-generator units on the quality of the produced electrical energy and on the operation of electrical engineering complexes as a whole. In this regard, the development of methods for identifying the presence and level of power exchange fluctuations in electrical engineering complexes is relevant.

The article examines the issue of ensuring the stable operation of ship electrical engineering complexes. When conducting research, real oscillograms of exchange and in-phase power fluctuations are used, taken during joint-parallel operation of diesel-generator units, common bus bars of the main switchboard. One of the problems of electro technical ship complexes of marine vessels is considered appearance of alternating and in-phase power fluctuations when diesel-generator units are connected in parallel. To eliminate such fluctuations, it is necessary to influence the speed regulators and change their transmission coefficients so as not to disturb the stable operation of the entire electro technical complex of the ship. It is necessary to determine the permissible range of change of gain coefficients of frequency regulators of jointly parallel-connected generators to preserve the stable operation of shipboard power plants of marine vessels.

The results of mathematical modeling allow us to conclude that it is necessary to limit the change in the values of gain coefficients of frequency regulators. Based on the results of mathematical modeling, it is possible to recommend limiting the change in gain coefficients of frequency regulators during parallel operation. It is proposed to limit the change in gain coefficients of frequency regulators while eliminating power exchange fluctuations.

**Key words:** power exchange fluctuations, parallel operation, autonomous electro technical complex, stability, generator set, the frequency regulator setting.

**Formulation of the problem.** In the modern world, the maritime fleet includes hundreds of maritime vessels that perform various functions [1]. The main tasks of maritime floating objects include transportation of various types of goods, as well as cargo and personnel, extraction of fish resources and hydrocarbons, laying pipelines and communications, state defense, ensuring operation in Arctic conditions, and others [2, 3]. On board any maritime vessel, there is an autonomous electrical system consisting of generating energy objects and devices and mechanisms that consume electrical energy [4]. The conditions and peculiarities of operating electrical systems of maritime vessels are regulated by the requirements of the Maritime Register of Shipping and the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) [5, 6]. Diesel generator sets connected in parallel are often used as sources of electrical energy, connected to the main distribution panel [7, 8]. The list of capacities and consumers is

very wide and is determined by the type and purpose of the vessel [9]. Ensuring the stable operation of the power station of a maritime vessel with the production of quality electrical energy is a vital condition for the safety of the vessel and the fulfillment of its technological and production tasks [10].

The most rational scheme for the production of electrical energy on maritime vessels is the parallel operation of several diesel generator sets from a technical and economic perspective [11]. Each diesel generator has its own speed governor and voltage regulator [12]. The settings of the regulators determine the load distribution between the units in quasi-steady-state operating modes of the electrical power complexes of maritime vessels, leading to exchange and in-phase oscillations of power between the parallel-connected generators [11]. To eliminate such oscillations, it is necessary to influence the speed governor and change their gain coefficients in such a way that the stable operation of the entire electrical

complex of the vessel is not disturbed. It is necessary to determine the permissible range of variation of the gain coefficients of frequency regulators for parallel-connected generators to maintain the stable operation of the power stations of maritime vessels.

**Analysis of recent research and publications.**

One of the problems of electrical ship complexes of maritime vessels is the occurrence of exchange and in-phase power oscillations when diesel generator sets are connected in parallel [11]. Such oscillations lead to accelerated wear of diesel speed governors, the inability to use generating devices at full capacity, pulsating voltage in the vessel electrical network, a decrease in the performance of electrical drives and ship automation systems, as well as the need to use mathematical modeling to evaluate permissible limits and ratios when changing the gain coefficients of frequency regulators [12].

For synchronous machines with rotor excitation winding, a slow number of  $0...n_d$  equivalent short-circuited circuits in the d-axis and a slow number of  $0...n_q$  equivalent short-circuited circuits in the q-axis, the Park-Horjev equations in per-unit values can be written in the following form:

$$\frac{d\psi_d}{d\tau} + \omega\psi_q + r_i i_d = -u_d, \quad (1)$$

$$\omega\psi_d - \frac{d\psi_q}{d\tau} - r_i i_q = u_q, \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_r}{d\tau} + r_r i_r = E_r, \quad (3)$$

Additionally, synchronous generators in stationary to d and q coordinates can be represented as a series of equations [11]:

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{d\tau} = -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_f}{d\tau} = u_f - r_f i_f, \quad (6)$$

where  $\psi_d, \psi_{sd}, u_d, u_{sd}, i_d, i_{sd}$  – The projections of the flux linkage vector, voltage vector, and stator current vector onto the d-axis can be represented as follows:

– Flux linkage vector projection on the d-axis:  
 $\psi_d = \psi \cdot \cos(\theta)$

– Voltage vector projection on the d-axis:  
 $V_d = V \cdot \cos(\theta_v)$

– Stator current vector projection on the d-axis:  
 $I_d = I \cdot \cos(\theta_i)$

Here,  $\psi_d$  is the flux linkage vector projection on the d-axis,  $\psi$  is the flux linkage magnitude,  $\theta$  is the angle between the flux linkage vector and the reference axis,  $V_d$  is the voltage vector projection on the d-axis,  $V$  is the voltage magnitude,  $\theta_v$  is the angle between the voltage vector and the reference axis,

$I_d$  is the stator current vector projection on the d-axis,  $I$  is the stator current magnitude,  $\theta_i$  is the angle between the stator current vector and the reference axis.

These equations represent the components of the vectors in the d-axis direction, which is a coordinate axis commonly used in the analysis of synchronous machines;

$\psi_q, \psi_{sq}, u_q, u_{sq}, i_q, i_{sq}$  – The projections of the flux linkage vector, voltage vector, and stator current vector onto the q-axis ;

$\psi_f, u_f, i_f, r_f$  – The projections of the flux linkage vector, voltage vector, current vector, and excitation winding resistance;

$\psi_r, i_r, r_r$  – Projection of the flux linkage vector, voltage, current, and active resistance of the excitation winding;

$E_r$  – Excitation voltage;

$\tau$  – Duration of the process.

The synchronous generator has a brushless exciter with a proportional voltage regulator:

$$\frac{du_f}{d\tau} = [-u_f + K_f (U_0 - u_m)] / T_a, \quad (7)$$

where  $K_f$  – Gain coefficient;

$U_0$  – Predetermined voltage value;

$$u_m = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}.$$

Based on the above statement, an equation can be written for a diesel engine:

$$J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_g, \quad (8)$$

$$M_d = K_m h, \quad (9)$$

$$M_g = \psi_{sg} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sg}, \quad (10)$$

where  $J_m$  – The referred moment of inertia of the diesel generator shaft;

$M_d$  – Diesel engine torque;

$M_g$  – Generator torque;

$h$  – Fuel rail displacement;

$K_m$  – Diesel speed gain coefficient.

Then the speed control regulator of the diesel engine installation will have the following form:

$$T_\omega \frac{dh}{d\tau} = K_\omega U_\varepsilon - h, \quad (11)$$

where  $T_\omega$  – A constant time value;

$K_\omega$  – Gain coefficient;

$U_\varepsilon$  – The difference between the set  $\omega_{r0}$  and actual  $\omega_r$  rotational frequencies.

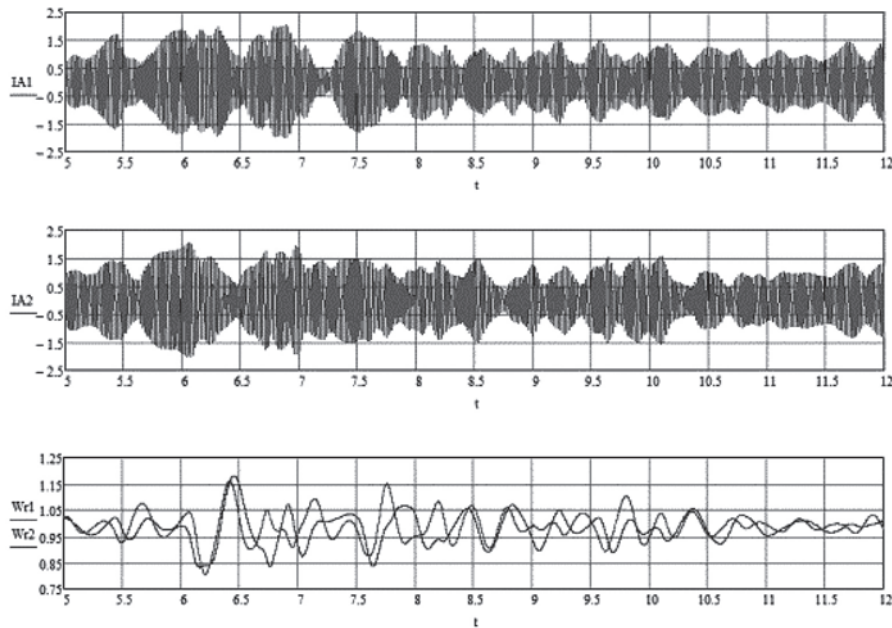
**Presenting main material.** In Fig. 1 you can see the results of the research using mathematical methods in the form of graphs of currents and rotational frequencies of two generators connected in parallel on the main distribution panel, at different values of proportional coefficients of their speed control regulators.  $K_{\omega 1} = 80$ ,  $K_{\omega 2} = 40$ . The current graphs show synchronous power oscillations with

a constant amplitude, while the generator rotational frequencies tend to reach the set value.

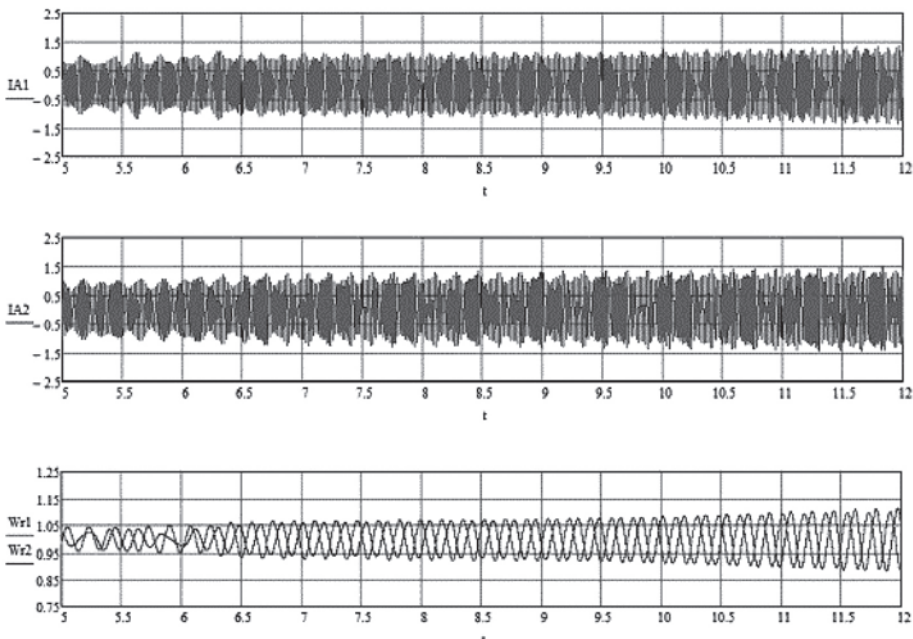
Figure 2 shows the results of mathematical control in the form of current and rotation frequency graphs of two generators operating in parallel on the main distribution panel busbars, with varying proportional coefficients (gain coefficients) of their rotation frequency regulators  $K_{\omega 1} = 350$ ,  $K_{\omega 2} = 250$ .

The presence of in-phase current oscillations and increasing amplitudes, as well as the increasing instantaneous rotation frequencies of the generators, indicates instability in the operation of the vessel power plant. This suggests an approaching activation of protection measures with subsequent power outage of the vessel.

**Discussion of experiments.** Thus, changing the proportional coefficients (gain coefficients) of



**Fig. 1. Results of mathematical modeling of parallel operation of generators with  $K_{\omega 1} = 80$ ,  $K_{\omega 2} = 40$**



**Fig. 2. Results of the investigation of parallel operation of generators with  $K_{\omega 1} = 350$ ,  $K_{\omega 2} = 250$**

the frequency regulators when paralleling diesel generators on the main distribution panel can lead to uncontrolled growth of in-phase power oscillation amplitudes and rotational frequencies. In order to ensure stable operation of the vessel power plant during changes in the gain coefficients of the frequency regulators, mathematical modeling was conducted at various transmission coefficient ratios. The research results, where stable operation of the vessel power plant is maintained, are presented in Table 1, and the settings map is depicted in Figure 3.

It can be observed that when the gain coefficients of the frequency regulators in the diesel generators are equal, there are no power oscillations. The difference in gain coefficients leads to the appearance of power oscillations, and their amplitude increases with the

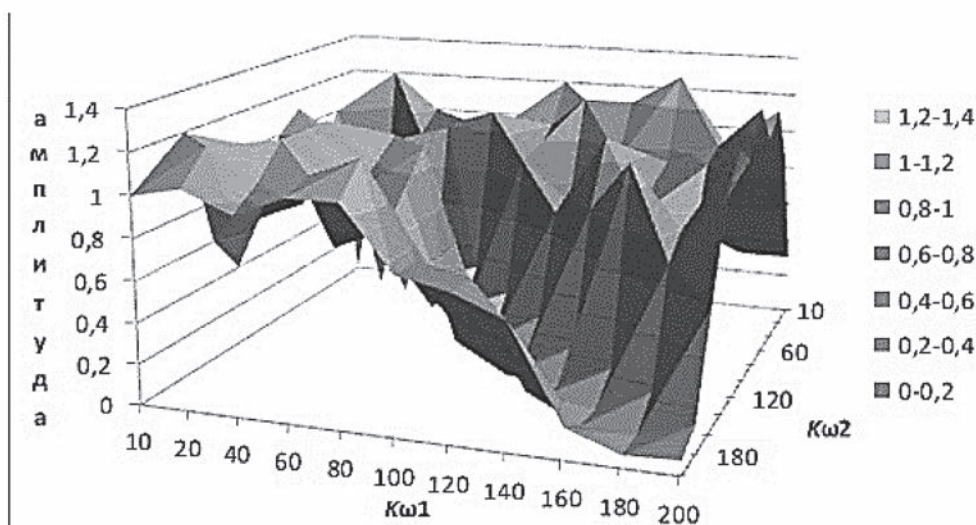
increase in the difference between the gain coefficient values within the range of 0 to 200, as shown in Figure 1. Parallel-connected diesel generators operate stably under such conditions. However, when the gain coefficients exceed certain values, as shown in Figure 2, power oscillations occur, indicating unstable parallel operation of the generators.

The above-mentioned data was obtained for electrical complexes of maritime vessels. However, they can be applied to any autonomous electrical system that utilizes parallel operation of diesel generator units. While the operating conditions of a maritime vessel are entirely autonomous, making the operation of its electrical complex crucial, extreme situations can also arise in land-based systems where the viability of an entire operation depends on reliable power supply.

Table 1

**Research the dependence of in-phase power oscillation amplitude of diesel generator on gain coefficient values of the frequency regulator in steady operation modes**

$K_{\omega 1} / K_{\omega 2}$	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
10	0,01	1,2	1	0,9	0,9	1,2	0,5	0,45	0,4	0,3	0,3
20	1	0,01	0,9	1	1	1	1,1	0,95	0,8	0,75	0,9
40	0,8	0,65	0,05	1	1,1	0,9	1,2	1,2	1,35	1	1,2
60	1,1	0,95	0,95	0,05	0,3	0,9	0,7	0,95	0,95	1,05	1,1
80	1	1	0,8	0,25	0,05	0,25	0,7	1,1	0,9	1	1,3
100	0,6	0,7	1,1	1,1	0,2	0,05	0,22	0,8	0,8	0,6	1,1
120	0,4	1	1,2	1	1,1	0,1	0,06	0,17	1,1	0,8	1,2
140	0,6	1,1	1,2	0,9	0,95	0,22	0,08	0,06	0,17	0,7	1,05
160	1,2	1	1,2	0,7	0,8	0,6	0,25	0,09	0,06	0,17	0,6
180	1,1	1,2	1,05	1,1	1,2	0,75	0,7	0,2	0,07	0,06	0,14
200	1	1,05	0,95	1,05	1,05	0,75	0,7	0,6	0,15	0,06	0,07



**Fig. 3. Map of the dependency of power oscillation amplitude on gain coefficient values of frequency regulators in diesel generator**

**Conclusion.** The conducted research has demonstrated the dependency of the stability of operation of a maritime vessel's electrical complex, with parallel connection to the main distribution panel of diesel generator units, on the values and ratios of gain coefficients of the frequency regulators. Based on the

results of mathematical modeling, it is recommended to limit the variation of gain coefficients of the frequency regulators within the range of 0–200 during parallel operation. Such limitation should be taken into account when adjusting the gain coefficients of the frequency regulators to mitigate power oscillations.

#### Bibliography:

1. Nigel Calder. Marine Diesel Engines: Maintenance, Troubleshooting, and Repair. International Marine/McGraw-Hill, New York, 2007. ISBN 978-0-07-177999-9. – 186p.
2. Tsekouras, G.J.; Kanellos, F.D. Optimal Operation of Ship Electrical Power System with Energy Storage System and Photovoltaics: Analysis and Application. WSEAS Trans. Power Syst. 2013, 8, 145–155.
3. Tsekouras, G.J.; Kanellos, F.D.; Prousalidis, J. Simplified Method for the Assessment of Ship Electric Power Systems Operation Cost Reduction from Energy Storage and Renewable Energy Sources Integration. IET Electr. Syst. Transp. 2015, 5, 61–69.
4. Huang, X.; Sun, S. Application of Wind Power Generation Technology in Ships. In Proceedings of the 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers, IPEC 2022, Dalian, China, 14–16 April 2022; pp. 1591–1593.
5. Kanellos, F.D.; Tsekouras, G.J.; Prousalidis, J. Onboard DC Grid Employing Smart Grid Technology: Challenges, State of the Art and Future Prospects. IET Electr. Syst. Transp. 2015, 5, 1–11.
6. Feng, X.; Zourtos, T.; Butler-Purry, K.L.; Mashayekh, S. Dynamic Load Management for NG IPS Ships. In Proceedings of the IEEE PES General Meeting, PES 2010, Minneapolis, MI, USA, 25–29 July 2010.
7. Tang, D.; Wang, H. Energy Management Strategies for Hybrid Power Systems Considering Dynamic Characteristics of Power Sources. IEEE Access 2021, 9, 158796–158807.
8. Nasioulas, E.C.; Tsekouras, G.J.; Kanellos, F.D. Bottom-up Reliability Analysis of a Base Load Diesel Engine Driven Electric Power Unit. WSEAS Trans. Power Syst. 2014, 9, 327–340.
9. Tsekouras, G.J.; Kanellos, F.D.; Tsirekis, C.D.; Mastorakis, N.E. Optimal operation of thermal electric power production system without transmission losses: An alternative solution using Artificial Neural Networks based on external penalty functions. In Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Databases (AIKED 2013), Cambridge, UK, 22–24 February 2013.
10. J.M. Prousalidis, E.Xanthopoulos & K.Voutzoulidis. Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators. Journal of Marine Engineering & Technology, 8:1, 21-38, DOI: 10.1080/20464177.2009.11020216.
11. Austin Huges, Bill Drury. Electric Motors and Drives. Fifth edition. Elsevier, Oxford, ISBN 978-0-08-102615-1, 2019, 496p.
12. Mukund R.Patel. Shipboard Electrical Power Systems. Second Edition. Taylor & Francis Group, New York, 2022, ISBN 9780367430351, 400p.

#### Дощенко Г.Г., Наговський Д.А. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТАЛОЇ РОБОТИ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

*У даний час існуючі системи керування паралельною роботою дизель-генераторних агрегатів не контролюють наявність обмінних коливань потужності та не обмежують їх рівень. Дослідження, що проводилися раніше, призвели до виявлення негативного впливу обмінних коливань потужності між паралельно працюючими дизель-генераторними агрегатами на якість вироблюваної електричної енергії і на роботу електротехнічних комплексів в цілому. У зв'язку з цим актуальним є розробка способів ідентифікації наявності та рівня обмінних коливань потужності в електротехнічних комплексах.*

*У статті розглядається питання забезпечення сталої роботи суднових електротехнічних комплексів при проведенні досліджень використовуються реальні осцилограми обмінних та синфазних коливань потужності, зняті при спільно-паралельній роботі дизель-генераторних агрегатів загальної шини головного розподільного щита. Однією з проблем електротехнічних суднових комплексів морських суден вважається поява обмінних та синфазних коливань потужності при спільно-паралельному включенні дизель-генераторних агрегатів. Для усунення таких коливань необхідно здійснювати вплив на регулятори частоти обертання та змінювати їх коефіцієнти передачі так, щоб не порушувалася стійка робота всього електротехнічного комплексу судна. Необхідно визначити допустимий діапазон зміни коефіцієнтів посилення частотних регуляторів спільно-паралельно включених генераторів для збереження сталої роботи суднових електростанцій морських суден.*

*Результати математичного моделювання дозволяють зробити висновок про необхідність обмеження зміни значень коефіцієнтів посилення частотних регуляторів. На основі результатів математичного моделювання можна рекомендувати обмежити зміну коефіцієнтів посилення частотних регуляторів при паралельній роботі. Запропоновано обмежити зміну коефіцієнтів посилення частотних регуляторів при усуненні обмінних коливань потужності.*

**Ключові слова:** обмінні коливання потужності, паралельна робота, автономний електротехнічний комплекс, стійкість, генераторний агрегат, налаштування регулятора частоти.

**Козенок А.С.**

Державний біотехнологічний університет

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДОЦІЛЬНОСТІ СТВОРЕННЯ ТРАНСКОРДОННИХ ТЕРМІНАЛІВ НА ЗАХОДІ УКРАЇНИ ПРИ ЕКСПОРТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВАНТАЖІВ

*У статті розглянуто питання розробки методики оцінки доцільності створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів. Проаналізовано сучасний стан міжнародних вантажних перевезень української сільськогосподарської продукції. Виявлено, що питання створення транскордонних терміналів на даний момент є актуальним і потребує детального вивчення. Виконано аналіз літературних джерел, пов'язаних з проблематикою досліджень. Він показав, що проблематикою функціонування транскордонних терміналів в західному регіоні України, доцільністю створення такого типу терміналів, оцінкою ефективності функціонування транскордонних терміналів при експорті сільськогосподарських вантажів вчені займалися недостатньо, що говорить про актуальність даного питання і перспективу подальших досліджень. Проведено аналіз існуючих методик оцінки доцільності створення терміналів, які вже використовуються. Дані методики засновано на наступних принципах: економічної оцінки витрат і прибутків, SWOT-аналізу, порівняльної оцінки, аналізу інвестиційного ризику, аналізу вартості. Проведено аналіз кожного з методів. Виявлено на яких принципах базуються розглянуті методи. Запропоновано розробку методики оцінки доцільності створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів на основі декількох блоків, таких, як: визначення цілей дослідження разом з ключовими показниками вимірювання ефективності терміналів; визначення зацікавлених сторін, на яких вплине створення транскордонних терміналів; вибір методів збору інформації для подальших досліджень; оцінка та обробка отриманих вихідних; розробка математичної або імітаційної моделі, виконання необхідних розрахунків за допомогою цієї моделі, перевірка моделі на адекватність, на основі отриманих результатів формування висновків про доцільність створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів. В результаті проведеного дослідження сформовано висновки по роботі, в яких вказано основні етапи дослідження та результати кожного з етапів.*

**Ключові слова:** транскордонні термінали, експорт, сільськогосподарські вантажі, критерій ефективності, міжнародні перевезення.

**Постановка проблеми.** До 2022 року Україна посідала друге місце в світі по експорту зернових (пшениця, овес, гречка, просо, жито, сорго). Також країна і зараз постачає такі види сільськогосподарської продукції, як соняшникову та соєву олії, насіння ріпака, кукурудзу, борошно, цукор, горіхи, мед і т.д.

Протягом багатьох років Україна намагається стати повноцінним членом європейської спільноти. І 28 лютого 2022 року Президент України Володимир Зеленський підписав заявку на членство України в Європейському Союзі. Також згідно з національною програмою «Відновлення України», яка була створена в 2023 році в зв'язку з війною Росії з Україною при підтримці Президента України, Верховної Ради, Кабінету Міністрів та Міністерством цифрової трансформації України прийнято для розвитку напрямом «Розширення та інтеграція логістики з ЄС». І одним

з пунктів цього напрямку є «С/г: Будівництво перевалочних комплексів та транскордонних терміналів на заході України» [1].

Це чуттєво спростить експорт української сільськогосподарської продукції в країни Західної Європи. Звісно, деякі країни, які істотно залежать від розвитку сільсько-господарської галузі (такі, як Польща, наприклад) намагаються регулювати цей процес, бо зазнають багатьох втрат на ринку експорту такого виду продукції через потужного конкурента в обличчі України. Тому необхідно розглядати це питання в комплексі з огляду на всі зацікавлені сторони даного процесу.

Ефективна мультимодальна транспортно-логістична система має важливе значення для всеосяжного економічного зростання України. Географічне положення України в центрі Східної Європи, на перехресті основних транспортних шляхів з Європи в Азію та від скандинавських держав



до регіону Середземномор'я, є дуже сприятливим середовищем для розвитку міжнародної торгівлі.

Україна також є світовим постачальником харчових продуктів та провідним експортером сільськогосподарської продукції, відіграючи життєво важливу роль у забезпеченні безпеки продуктів харчування у світі. Оскільки міжнародна торгівля складає велику частину ВВП України, важливе значення має ефективне використання логістичної системи. Враховуючи важливість міжнародної торгівлі та вплив геополітичних подій на транспортні маршрути та витрати, логістика відіграватиме все більш значущу роль у сталому розвитку країни.

Ефективна логістика також важлива для внутрішнього ринку, щоб доступні, безпечні та надійні транспортні та інші логістичні послуги могли допомогти українській економіці розвиватися стабільно власне в економічному, соціальному та екологічному аспектах [2].

Щоб убезпечити світ від продовольчої кризи, яка можлива через російську агресію, уряд України спільно зі світовою спільнотою має намір реалізувати низку масштабних проєктів, зокрема, спрямованих на експорт української продукції.

Один з проєктів – будівництво перевантажувальних транскордонних терміналів для зернових культур та олій. Їхня основна ідея – перетин кордону продукцією через зернові конвеєри та трубопроводи для олій [3].

Отже, з огляду на всі наведені вище факти, тема являється актуальною та потребує детального вивчення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перелік авторів, які займаються дослідженнями проблематики транскордонного співробітництва України з країнами Європи, наступний: І.В. Артьомов, В.П. Приходько, О. Ровт та ін [4, с. 76–77; 5, с. 9; 6, с. 53–56]. Аналіз даних публікацій показав, що питання будівництва та функціонування термінальних систем на кордонах України і Європейських країн зовсім не розкриті.

Роботи присвячені дослідженню підвищення ефективності транспортних систем і підприємств належать таким авторам: Є.В. Нагорному, Н.Ю. Шраменко, В. Наумову і ін. [7, с. 51–53; 8, с. 43–46; 9, с. 48–50]. В багатьох з цих робіт багато уваги приділяється вибору критеріїв ефективності вантажних терміналів при міжнародних перевезеннях різних видів вантажів. За критерії ефективності пропонується обирати: час доставки вантажів, вартість доставки, витрати на доставку і т.ін. В основному вивчаються контейнерні перевезення, перевезення тарно-штучних вантажів,

але недостатньо приділена увага проблемам міжнародних перевезень при експорті сільськогосподарських вантажів.

Розробкою методик оцінки ефективності функціонування різних видів підприємств і організацій займаються наступні вчені: О.І. Дмитриєва, О.М. Зінченко, М.І. Насонов і т.д [10, с. 122–144; 11, с. 87–96; 12, с. 9]. Дані методики можна адаптувати і для оцінки ефективності функціонування транспортних та складських систем. Для цього необхідно виконати детальний аналіз запропонованих методик.

В роботі [13, с. 12–18] розглядаються питомі витрати логістичної системи з певною надійністю в експлуатації автопарку при перевезенні такої сільськогосподарської продукції, як буряки. Для вибору оптимального варіанту транспортних засобів запропоновано графічний метод оцінки. Він забезпечує оптимальне значення комплексного показника. Але в роботі не розглядається можливість міжнародних перевезень даного виду сільськогосподарської продукції.

Отже, аналіз розглянутих публікацій показав, що проблематикою функціонування транскордонних терміналів в західному регіоні України, доцільністю створення такого типу терміналів, оцінкою ефективності функціонування транскордонних терміналів при експорті сільськогосподарських вантажів вчені займалися недостатньо, що говорить про актуальність даного питання і перспективу подальших досліджень.

Тому можна запропонувати **мету подальших досліджень**, яка полягає в розробці методики оцінки ефективності створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів.

**Виклад основного матеріалу.** Існує кілька методів оцінки ефективності доцільності створення транскордонних терміналів. Ось декілька з них:

1. Метод економічної оцінки витрат і прибутків – дозволяє визначити доходи та витрати на створення терміналу, порівняти їх та визначити доцільність інвестування.

2. Метод SWOT-аналізу – дозволяє проаналізувати сильні та слабкі сторони терміналу, а також можливості та загрози для його діяльності.

3. Метод порівняльної оцінки – дозволяє порівняти різні варіанти створення терміналу та визначити найбільш доцільний варіант.

4. Метод аналізу інвестиційного ризику – дозволяє визначити рівень ризику та прийняти рішення щодо інвестування в створення терміналу.

5. Метод аналізу вартості – дозволяє оцінити вартість створення терміналу та порівняти її з очікуваними доходами.

Розберемося з кожним з методів більш детально.

Метод економічної оцінки витрат і прибутків (англ. Cost-benefit analysis, CBA) є інструментом, який використовується для оцінки економічної доцільності різних проектів і програм. Цей метод полягає в порівнянні загальних витрат на виконання проекту з очікуваними користями від його реалізації.

Метод CBA включає такі етапи:

- визначення альтернатив: спочатку необхідно визначити всі можливі варіанти реалізації проекту;
- визначення вартості: на другому етапі проводиться оцінка вартості кожної альтернативи.
- визначення користі: на третьому етапі оцінюється очікувана користь від кожної альтернативи.
- порівняння витрат та користі: на цьому етапі порівнюються витрати та користь кожної альтернативи.
- оцінка ефективності: на останньому етапі проводиться оцінка ефективності кожної альтернативи.

Використання методу CBA допомагає забезпечити максимальну користь від реалізації проекту, а також підвищує ефективність витрачених коштів. Цей метод використовується в різних галузях, таких як економіка, бізнес, громадська політика та інфраструктура.

SWOT-аналіз допомагає компанії отримати цінні інсайти про її внутрішні та зовнішні фактори, а також зрозуміти, як ці фактори можуть вплинути на її бізнес. Аналіз проводиться шляхом оцінки чотирьох основних аспектів: сильні сторони (Strengths) – внутрішні позитивні фактори, які дозволяють компанії бути конкурентоспроможною; слабкі сторони (Weaknesses) – внутрішні негативні фактори, які обмежують можливості компанії; можливості (Opportunities) – зовнішні позитивні фактори, які можуть стати перевагою для компанії; загрози (Threats) – зовнішні негативні фактори, які можуть стати перешкодою для успіху компанії.

Метод порівняльної оцінки – це метод, за допомогою якого порівнюють характеристики об'єктів, які мають однакову або схожу функціональну призначеність, з метою встановлення їх переваг та недоліків.

Цей метод використовується в різних сферах, включаючи оцінку нерухомості, автомобілів, комп'ютерів, товарів і послуг, та дозволяє порів-

няти характеристики об'єктів за рядом параметрів, таких як вартість, функціональність, якість, термін служби тощо.

Для застосування методу порівняльної оцінки необхідно визначити список характеристик, за якими будуть порівнюватися об'єкти. При цьому кожна з характеристик може мати різний ваговий коефіцієнт, залежно від її значимості для кінцевого результату.

Для отримання достовірних результатів метод порівняльної оцінки необхідно використовувати об'єкти, які належать до одного класу і мають схожу функціональну призначеність. Також важливо брати до уваги те, що розроблення списку характеристик для порівняння може бути підвладним індивідуальному сприйняттю та оцінці.

Метод порівняльної оцінки є одним з найбільш поширених методів оцінки в різних сферах діяльності і дозволяє здійснювати об'єктивну оцінку різних альтернатив на основі порівняння їх характеристик.

Метод аналізу інвестиційного ризику – це процес визначення ризику втрати грошей в результаті інвестування в певний проект або підприємство. Цей метод дозволяє інвесторам розуміти, які ризики пов'язані з інвестиціями, та приймати розсудливі рішення щодо розподілу своїх інвестицій.

Основними етапами методу аналізу інвестиційного ризику є:

- а) збір і аналіз інформації про підприємство або проект, у який ви збираєтесь інвестувати;
- б) визначення різних видів ризиків, пов'язаних з проектом або підприємством, наприклад, фінансовий ризик, ризик зміни ринкових умов, ризик залежності від ключових персон тощо;
- в) оцінка ймовірності настання кожного з ризиків;
- г) визначення можливих наслідків кожного з ризиків для інвестора та об'єкта інвестування;
- г) визначення рівня ризику загалом та розробка стратегій зменшення ризику;
- д) прийняття рішення щодо інвестування в проект або підприємство на основі розрахунків зі зведеного аналізу ризиків.

Метод аналізу вартості – це метод оцінки вартості компанії або її активів на основі фінансової звітності і порівняння з аналогічними компаніями на ринку.

Основні етапи методу аналізу вартості: вибір аналогічних компаній, які мають подібну діяльність та ринкову позицію; зібрання та аналіз фінансових показників аналогічних компаній за допомогою різних методів аналізу, таких як аналіз балансу, звіту про прибутки та збитки, генерації потоків

грошових коштів; порівняння фінансових показників аналогічних компаній з фінансовими показниками компанії, що оцінюється; визначення ступеня відхилення фінансових показників оцінюваної компанії від аналогічних компаній та визначення вартості компанії на основі цього порівняння.

Даний метод є досить популярним в оцінці вартості акцій на фондовому ринку.

Розробку методики оцінки ефективності створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів, яка пропонується автором роботи, можливо виконати в декілька кроків.

Перший блок розробки методики оцінки складається з наступних пунктів:

1. Визначення цілей дослідження. Яка мета створення транскордонних терміналів на заході України для експорту сільськогосподарських вантажів? Які вигоди очікуються? Які ключові показники ефективності використовуватимуться для вимірювання ефективності терміналів?

Критерії ефективності функціонування транскордонних терміналів можуть варіюватися в залежності від конкретної ситуації та цілей дослідження. Однак, деякі з загальних критеріїв, які можуть бути використані для оцінки ефективності транскордонних терміналів, включають:

- обсяги перевезень: одним з головних критеріїв ефективності може бути кількість вантажів, які перевозяться через термінал. Більш високі обсяги перевезень можуть свідчити про успішне функціонування терміналу;

- час очікування: тривалість очікування на терміналі може впливати на рівень задоволеності клієнтів та загальну ефективність терміналу. Якщо час очікування зменшується, то це може позитивно впливати на ефективність терміналу;

- вартість: вартість перевезень через термінал може впливати на його ефективність. Якщо вартість перевезення з використанням терміналу нижча, ніж вартість перевезення бесперевалочним способом, то це може збільшити його конкурентоспроможність та привабливість для клієнтів;

- надійність: надійність терміналу та його здатність забезпечувати стабільність у перевезеннях може також впливати на його ефективність;

- середні витрати на один вантаж: середні витрати на перевезення одного вантажу через термінал можуть впливати на його ефективність та привабливість для клієнтів;

- кількість помилок та затримок: кількість помилок та затримок на терміналі можливі за рахунок неякісного обслуговування вантажовлас-

ників або по причинах, які не залежать від функціонування терміналу: невчасна подача рухомого складу під навантаження, затримки при митному оформленні вантажів і т.д.

2. Визначення зацікавлених сторін, на яких вплине створення транскордонних терміналів на заході України для експорту сільськогосподарських вантажів. Це можуть бути фермери України, транспортні підприємства регіону, отримувачі (замовники) сільськогосподарських вантажів за кордоном і т.д.

3. Визначення джерел даних, які будуть використовуватися для оцінки ефективності транскордонних терміналів. Вони можуть включати статистику торгівлі, транспортні дані, дослідження ринку та інтерв'ю із зацікавленими сторонами.

Після реалізації першого блоку даної методики потрібно переходити до більш детальної розробки за наступними етапами:

1. Розробити план дослідження: після визначення цілей наступним кроком є розробка плану дослідження. Цей план має включати питання дослідження, методи збору даних і методи аналізу. Наприклад, можна провести опитування чи інтерв'ю із зацікавленими сторонами, такими як фермери, логістичні компанії та урядовці, щоб зібрати інформацію про поточний стан сільськогосподарського експорту та потенційний вплив транскордонних терміналів.

2. Визначити вихідні дані, які необхідні для оцінки ефективності створення транскордонних терміналів в західному регіоні України для експорту сільськогосподарських вантажів в країни Європи. Це можуть бути: дані про поточний стан сільськогосподарського експорту в Україні, включаючи обсяги та вартість експорту, типи культур, які експортуються, пункти призначення експорту та існуючу інфраструктуру для експорту сільськогосподарської продукції, обсяги перевезень, час доставки і багато інших.

3. Визначити зацікавлені сторони, на яких вплине створення транскордонних терміналів на заході України для експорту сільськогосподарських вантажів. Це можуть бути фермери, експортери, імпортери, логістичні компанії, державні установи та місцеві громади. Але як вже було зазначено вище маємо врахувати інтереси як української сторони так і інтереси європейських країн..

4. Провести огляд літератури: провести огляд фільтрації, щоб визначити існуючі дослідження, пов'язані з транскордонними терміналами, експортом сільськогосподарської продукції та транспортною інфраструктурою в регіоні.

5. Визначити ключові показники ефективності, які використовуватимуться для оцінки доцільності створення транскордонних терміналів для експорту сільськогосподарських вантажів. Деякі можливі показники ефективності включають:

– обсяг перевезень: вимірює кількість сільськогосподарських вантажів, які можуть оброблятися та експортуються через транскордонні термінали;

– транзитний час: вимірює час, потрібний сільськогосподарським вантажам для переміщення через транскордонні термінали та досягнення місця призначення;

– економічна ефективність: чи існують транскордонні термінали на заході України для експорту сільськогосподарських вантажів? Які ключові фактори сприяють економічній ефективності транскордонних терміналів? Як транскордонні термінали відрізняються від інших видів транспорту з точки зору ефективності витрат?

6. Визначити методи збору даних, які будуть використовуватися для відповідей на запитання дослідження. Це може включати опитування, інтерв'ю, фокус-групи та аналіз даних наявних звітів і статистики.

7. Зібрати необхідні дані обраним способом, провести статистичну обробку даних, обрати критерій ефективності, за яким можна оцінювати доцільність створення транскордонних терміналів, розробити математичну або імітаційну модель, зробити необхідні розрахунки за допомогою цієї моделі, перевірити модель на адекватність, на основі отриманих результатів зробити висновки про доцільність створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів.

І нарешті, для оцінки ефективності створення транскордонних терміналів на заході України для експорту сільськогосподарських вантажів необхідно враховувати наступні пункти:

1) визначення потенційних ринків збуту для сільськогосподарських вантажів, на які спрямований експорт;

2) аналіз транспортних маршрутів та виділення оптимальних маршрутів для доставки вантажів до транскордонного терміналу;

3) визначення місця розташування транскордонного терміналу, що б забезпечувало зручний доступ для транспортних засобів з урахуванням географічного положення ринків збуту;

4) Відбір партнерів та контрагентів для забезпечення ефективного функціонування транскордонного терміналу;

5) Розробка бізнес-плану транскордонного терміналу з урахуванням всіх витрат на будівництво, устаткування, персонал, а також очікувані доходи від експорту сільськогосподарських вантажів;

6) Розрахунок показників ефективності транскордонного терміналу, таких як рентабельність, чистий дисконтований дохід (НДД), індекс доход-

ності проекту (IRR), термін окупності (Payback period) та ін.;

7) врахування ризиків, пов'язаних з експортом сільськогосподарських вантажів, таких як зміна курсів валют, транспортні пригоди, регуляторні ризики тощо;

8) підготовка презентації проекту для потенційних інвесторів та фінансових установ;

9) Реалізація проекту та моніторинг його ефективності в процесі експлуатації.

Як бачимо, для створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів є багато передумов. Розміщення, спеціалізація транскордонних терміналів, склад їхніх приміщень, конструкції, наявність устаткування і технологія роботи повинні відповідати умовам міжнародних перевезень сільськогосподарських вантажів і дозволяти обслуговувати різні міста і регіони.

Створення сучасної системи транскордонних терміналів в західному регіоні України при експорті сільськогосподарських вантажів вимагає проведення широкого кола наукових розробок по керуванню роботою терміналів, розширенню їхніх функцій з урахуванням використання принципів логістики, застосуванню прогресивних технологій перевезень і переробки вантажів, а також розвитку інформаційних технологій.

**Висновки.** У статті розглянуто питання розробки методики оцінки доцільності створення транскордонних терміналів у Західній Україні для експорту сільськогосподарських товарів. Аналіз сучасного стану міжнародних вантажних перевезень української сільськогосподарської продукції показав, що питання створення транскордонних терміналів є актуальним і потребує детального вивчення. Проведений аналіз літературних джерел за темою дослідження показав, що проблеми функціонування транскордонних терміналів у західному регіоні України, доцільність створення такого типу терміналів, оцінка ефективності функціонування транскордонних терміналів при експорті сільськогосподарських товарів недостатньо вивчені науковцями, що свідчить про актуальність цього питання та перспективу подальших досліджень. У статті проаналізовано існуючі методи оцінки доцільності створення терміналів, які вже використовуються. Запропоновано розробити методику оцінки доцільності створення транскордонних терміналів на заході України для експорту сільськогосподарської продукції на основі декількох блоків, таких як: визначення цілей дослідження разом з ключовими показниками для вимірювання ефективності роботи терміналів; визначення стейкхолдерів, на яких вплине створення транскордонних терміналів; вибір методів збору інформації для подальшого дослідження; оцінка та обробка отриманих даних; розробка математичної або імітаційної моделі,

виконання необхідних розрахунків за допомогою цієї моделі, перевірка модель на адекватність, на основі отриманих результатів формування висно-

вків про доцільність створення транскордонних терміналів на заході України при експорті сільськогосподарських вантажів.

#### Список літератури:

1. Національна програма «Відновлення України»// Розширення та інтеграція логістики з ЄС// С/Г: Будівництво перевалочних комплексів та транскордонних терміналів на заході України /<https://recovery.gov.ua/project/program/logistics-de-bottleneck-and-integration-with-eu?page=4>
2. Стратегія сталої логістики та План дій для України. Проект для розгляду. Міністерство Інфраструктури України. С. 24 / <https://mtu.gov.ua/files/Logistics.pdf>
3. Бикова А. В Україні побудують перевантажувальні транскордонні термінали для зернових культур та рослинних олій /[https://logist.today/uk/dnevnik\\_logista/vojna-v-ukraine/2022-07-07/v-ukraine-postroyat-peregruzochnoye-transgranichnoye-terminaly-dlya-zernovyh-kultur-i-rastitelnyh-masel/](https://logist.today/uk/dnevnik_logista/vojna-v-ukraine/2022-07-07/v-ukraine-postroyat-peregruzochnoye-transgranichnoye-terminaly-dlya-zernovyh-kultur-i-rastitelnyh-masel/)
4. Артёмов І.В. Транскордонне співробітництво в євроінтеграційній стратегії України: монографія / відп.ред. І.В. Артёмов. Ужгород: Закарпатський державний університет, 2009. С.76-77.
5. Приходько В.П. Транскордонне економічне співробітництво в карпатському євро регіоні в контексті сталого просторового розвитку. *Ефективна економіка*. 2019. № 10. С. 9.
6. Ровт О. Системне моделювання управління транскордонним співробітництвом. *Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної конференції Закарпатського державного університету*. 2007. № 1 С. 53-56.
7. Нагорний Є.В., Самойленко А.С. Оцінка ефективності прискореної переробки тарно-штучних вантажів на терміналі. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2008. № 31/1. С. 51-53.
8. Шраменко Н.Ю. Системний підхід до процесу доставки вантажів в міжнародному сполученні в умовах невизначеності. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2009. № 6. С. 43-46.
9. Наумов В.С., Чернуха О.С. Дослідження ефективності використання вантажних автомобілів із урахуванням екологічних показників транспортного процесу. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2009. № 37/1. С. 48-50.
10. Дмитрієва О.І. Методичний підхід до оцінки ефективності функціонування підприємств транспортної інфраструктури. *Економіка транспортного комплексу*. 2020. № 35. С. 122-144.
11. Зінченко О.М. Методика оцінки ефективності функціонування підприємств роздрібно-торгівлі споживчої кооперації на сільському споживчому ринку. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2017. № 2 (80). С. 87-96.
12. Насонов М.І. Методика оцінювання управління ефективністю підприємства: теоретичні аспекти. *Ефективна економіка*. 2018. № 11. С. 9.
13. Vojtov, V.A., Muzylyov, D.A., Berezchnaja, N.G. Integrated approach in calculation of the economic effect of the functioning of the transport and logistic complex with the account of the risk factor. *Web of Scholar*. 2018. № 1(3). P. 12-18.

#### **Kozenok A.S. METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FEASIBILITY OF ESTABLISHING CROSS-BORDER TERMINALS IN WESTERN UKRAINE FOR THE EXPORT OF AGRICULTURAL GOODS**

*The article considers the issue of developing a methodology for assessing the feasibility of creating cross-border terminals in western Ukraine for the export of agricultural goods. The current state of international freight transport of Ukrainian agricultural products is analysed. It is found that the issue of creating cross-border terminals is currently relevant and requires a detailed study. An analysis of the literature sources related to the research issues is carried out. It showed that the problems of functioning of cross-border terminals in the western region of Ukraine, the feasibility of creating this type of terminals, and the assessment of the efficiency of cross-border terminals in the export of agricultural goods have not been sufficiently studied by scientists, which indicates the relevance of this issue and the prospect of further research. The article analyses the existing methods for assessing the feasibility of creating terminals that are already in use. These methods are based on the following principles: economic assessment of costs and profits, SWOT analysis, comparative assessment, investment risk analysis, and cost analysis. An analysis of each method is carried out. The principles on which the considered methods are based have been identified. It is proposed to develop a methodology for assessing the feasibility of creating cross-border terminals in western Ukraine for the export of agricultural goods based on several blocks, such as: defining the objectives of the study along with key indicators for measuring the efficiency of terminals; identifying stakeholders who will be affected by the creation of cross-border terminals; selecting methods for collecting information for further research; evaluating and processing the obtained data; developing a mathematical or simulation model, performing the necessary calculations for the As a result of the study, conclusions have been drawn, which indicate the main stages of the study and the results of each stage.*

**Key words:** cross-border terminals, exports, agricultural cargo, efficiency criterion, international transportation.

**Колодницька Р.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

У всьому світі за 2020 рік було випущено біля 80 млн транспортних засобів. Зменшення витрати палива від автомобільного транспорту – одна із ключових проблем сьогодення. Для зменшення витрати палива потрібно знизити витрати, що пов'язані з рухом автомобіля по дорозі і через повітря. Для цього потрібно зменшити вагу автомобіля, знизити аеродинамічний опір, підвищити опір коченню і зменшити тертя. Але 90% економії витрати палива залежать від силового агрегату автомобіля. Альтернативне дизельне паливо має інші фізичні властивості, властивості розпилювання, випаровування і згоряння, ніж дизельне паливо. Застосування моделей витрати дизельних палив до альтернативних палив не завжди дає вірний результат. Метою статті є аналіз моделей витрати палива в застосуванні до альтернативних дизельних палив, включаючи дизельне біопаливо. В роботі проаналізовано моделі витрати палива як для питомої витрати, так і годинної витрати палива в застосуванні до альтернативних дизельних палив: біодизеля (дизельне біопаливо), відновлювального дизельного палива (HVO), та синтетичного палива (GTL). Як правило, менша витрата палива автомобіля пов'язана з більш високим вмістом енергії в його паливі, тобто з теплотою згоряння. Паливо, що має більше цетанове число, зазвичай приводить до меншої витрати палива. Густина впливає на впорскування в ДВЗ, зі збільшенням густини палива збільшуються розміри крапель і погіршується розпилювання палива, що, як правило, приводить до збільшення витрати палива. Як моделювання, так і експериментальні дані показали, що біодизельне паливо має більшу витрату палива, а GTL та HVO – меншу витрату, ніж дизельне паливо. Показано вплив властивостей палива, а саме густини, цетанового числа і теплоти згоряння на витрату палива. Хоча моделювання відносної витрати альтернативного дизельного палива за розглянутими моделями показує гарне співпадіння з експериментальними даними, потрібно більше експериментальних даних, для того щоб врахувати точніше вклад густини палива у його витрату. Залежність витрати альтернативних дизельних палив від в'язкості палива може бути темою наступних досліджень.

**Ключові слова:** автомобільний транспорт, витрата палива, альтернативне паливо, дизельне біопаливо, біодизель, HVO.

**Постановка проблеми.** У всьому світі за 2020 рік було випущено біля 80 млн транспортних засобів (ТЗ), з яких 25 млн випущено в Китаї, 11 млн. – в Європі, 8 млн. – в Північній Америці, 8 млн. – в Японії і залишок – в Південній Кореї, Мексиці і Індії [1, с. 9]. Зменшення витрати палива автомобільним транспортом (АТ) – одна із ключових проблем сьогодення. Для зменшення витрати палива потрібно знизити витрати, що пов'язані з рухом ТЗ по дорозі і через повітря. Для цього необхідно: зменшити вагу автомобіля; знизити аеродинамічний опір (aerodynamic drag); підвищити опір коченню і зменшити тертя (rolling resistance and friction improvement) [1, с. 4]. При використанні альтернативних палив у автомобілях, що мроживають дизельне паливо, моделювання витрати палива – не дуже проста задача. Адже альтернативне дизельне паливо має інші фізичні властивості, властивості розпилювання і випаровування і згоряння, ніж дизельне паливо.

Використання моделей витрати дизельного палива (ДП) до альтернативних палив не завжди дає вірний результат.

**Метою статті** є аналіз моделей витрати палива в застосуванні до альтернативних дизельних палив, включаючи дизельне біопаливо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1, с. 7] відмічається, що тільки 10% від всього зниження витрати палива можна досягти удосконаленням технологій ТЗ (vehicle technology), отже, 90% досягається за рахунок покращення силової установки (propulsion system). Детальний огляд моделей витрати палива зроблений в [2, с. 202–203]. В цій же роботі були проаналізовані витрати палива, що підраховані у програмі СМЕМ за вісьма різними циклами для різних категорій автомобілів [2, с. 203–205].

Витрата палива для ТЗ, що використовують альтернативне паливо досліджена все ще недостатньо. Як правило, витрату палива вимірюють

експериментально. В [3, с. 255] досліджують витрату палива для двох біодизельних палив різного складу. Було знайдено, що для біодизеля складу А витрата палива (кг/год) була на 7% більша, а для біодизеля В – на 10% більша, ніж для ДП. Як вважають автори [3, с. 255] це значить, що біодизель В має меншу теплоту згоряння (energy content), ніж біодизель А і обоє ці палива містять менше енергії, ніж ДП.

Не зрозуміло також вплив різних характеристик палива на його витрату. В роботі [4, с. 4] було проаналізовано експериментальні дані для широкого діапазону альтернативних палив і приведені залежності відносної зміни витрати альтернативних палив у порівнянні з ДП.

Витрата біодизельного палива була проаналізована в монографії [5, с. 138], використовуючи відомі моделі Говорущенка. Моделювання витрати палива (л/100 км) гарно співпадало з експериментальними даними для біодизельного палива [5, с. 136] і були більшими на 11.5% в порівнянні з ДП. На жаль, використання моделі Говорущенка пов'язано потребує характеристики двигуна і автомобіля, які часто недоступні для нових марок. Отже, потрібно проаналізувати більш детально фактори, які впливають на витрату палива альтернативних ДП, використовуючи сучасні моделі з врахуванням нової процедури по витраті палива для нових марок автомобілів, що описана в [6, с. 2]. Окрему увагу потрібно приділити новим видам альтернативного дизельного палива, наприклад, відновлювальному дизельному паливу (HVO), властивості якого описані в роботах [7, 8].

### Основна частина.

#### 1. Зменшення витрати палива для автомобільного транспорту

*Зменшення ваги* – це ключ до зменшення затрат енергії згідно закону Ньютона  $F = m \times a$ . Чим більше маса, тим більше потрібно затратити сили, а отже й енергії, щоб надати прискорення ТЗ. Маса відіграє ключову роль під час тертя шин ТЗ по дорозі, при чому тертя пропорційне опорі коченню ТЗ [1, с. 4].

*Зниження аеродинамічного опору:*

$$F = C_d \times A,$$

де  $F$  – сила (Force);  $C_d$  – коефіцієнт опору (Drag Coefficient);  $A$  – лобова площа ТЗ (frontal Area of vehicle) [1, с. 4].

Для того щоб зменшити коефіцієнт опору  $C_d$ , автомобіль має бути спростованим таким чином, щоб потік повітря був ламінарними. Також багато структурних елементів автомобілю допомагають зменшенню аеродинамічного опору пові-

тря. Наприклад, моделі Ford Focus 2010 мають активні радіаторні заслінки (shutters), які закривають потік повітря, коли автомобіль вже не потребує охолодження [1, с. 6].

*Підвищення опору коченню і зменшення тертя.* Ці втрати можуть бути зменшені шляхом зменшення тертя і також паразитичних втрат, коли автомобіль не рухається (їх називають «hotel load») [1, с. 6]. Бажано використовувати шини з низьким опором коченню, також важливо запобігти втрат енергії через роботу вихлопної і гальмівної системи.

Як показано в роботі [2, с. 203], цикли водіння також мають значний вплив на витрату палива. Існують різні типи циклів, такі як Новий європейський цикл водіння (NEDC, New European Driving Cycle) або Всесвітня гармонізована процедура випробувань легких транспортних засобів (WLTP, Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure) [4, с. 3]. В [4, с. 4] були вибрані цикли водіння NEDC, що включали 4 цикли міського водіння та один додатковий цикл. Результатом циклів водіння є лише одне значення витрати палива на кожне випробуване паливо, що є корисним з точки зору моделювання [4, с. 4].

WLTP замінила процедуру випробувань NEDC для встановлення офіційного споживання палива та викидів CO<sub>2</sub> нових автомобілів у вересні 2017 року, яка стала обов'язковою для всіх нових автомобілів (що працюють від ДВЗ) до вересня 2018 року [6, с. 2]. Хоча і всі випробування і далі будуть проводитися в лабораторіях, але одним з очевидних відмінностей є структура даних, отриманих в результаті нового тесту. Для бензинових або дизельних автомобілів, терміни, що використовуються для опису фаз водіння тестового циклу: «міський», «позаміський» і «комбінований», більше не використовуються. Замість цього тест водіння представлений як «низький», «середній», «високий», «надвисокий» і «комбінований» [6, с. 2]. На жаль, база даних WLTP [6] для нових автомобілів, що складається з 4719 записів містить дані про автомобілі, що споживають бензин, ДП, бензин + LPG (liquid petroleum gas, скраплений газ) та дані для електромобілів і гібридних автомобілів. Отже, моделювання витрати палива для ТЗ, що використовують альтернативне паливо – одна із важливих задач.

#### 2. Моделі витрати палива для альтернативних дизельних палив.

В [4, с. 7] приведено модель для визначення відносної зміни витрати альтернативного палива відносно дизельного палива для АТ:

$$\alpha_{FC} = -1.113E - 0.076F - 1.075C, \quad (1)$$

де  $\alpha_{FC}$  – витрата палива (відносна зміна);  $E$  – NCVmass (відносна зміна);  $F$  – цетанове число CN (відносна зміна);  $C$  – густина (відносна зміна).

Відносні зміни властивостей  $C(X_R)$  [4, с. 4] розраховуються як:

$$C(X_R) = (C_R(X_R) - C_S) / C_S \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $C(X_R)$  – значення питомої властивості палива для суміші альтернативного палива залежно від концентрації альтернативного палива  $X_R$ ;  $C_S$  – значення питомої властивості палива для стандартного палива (дизельного палива).

Як правило, менша витрата палива ТЗ пов'язана з більш високим вмістом енергії в цьому паливі, тобто з теплою згоряння. Але не тільки вміст енергії в паливі впливає на продуктивність двигуна, але й інші властивості палива, такі як густина або цетанове число, відіграють значну роль. Паливо, що має більше цетанове число, зазвичай пов'язане з меншою витратою палива [4, с. 7]. Густина впливає на впорскування в ДВЗ; зі збільшенням густини палива збільшуються розміри крапель і погіршується розпилювання палива, що, як правило, приводить до збільшення витрати палива. Виходячи з цих міркувань не зрозумілий знак “-”, з яким густина входить в формулу (1), що запропонована в [4, с. 7].

Автори [3, с. 260] також вважають, що споживання автомобілем біодизеля буде вищим, коли двигун заправляється біодизелем більшої густини. Порівняння витрати палива для двох видів біодизельного палива показано на рис. 1. Два різних види біодизеля, тип А [80% (яловичина, свинина і жир вівці) і 20% олії канолі метилового ефіру] і тип В [70% курячого валу і 30% відходів кулінарної олії метилового ефіру], були використані для експериментів в цьому дослідженні.

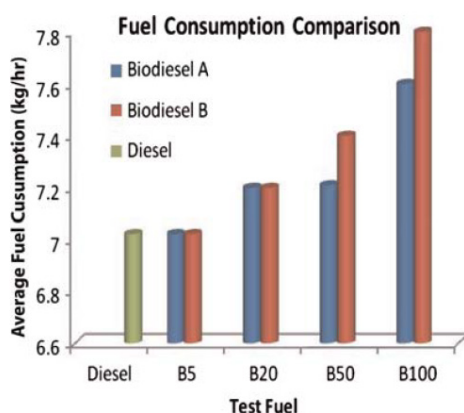


Рис. 1. Середня витрата палива (кг/год) для біодизеля типу А і типу В в порівнянні з дизельним паливом та різними сумішами цих палив [3, с. 258]

Виходячи з експериментів, що показані на рис. 1, середня зміна масової витрати (кг/год) біодизельного палива становить для біодизеля типу А 8.51%, а для біодизеля типу В – 11.35% в порівнянні з ДП. Очевидно, що біодизельні палива мають нижчий вміст енергії, ніж викопне дизельне паливо або відновлювальне дизельне паливо (HVO, hydrotreated vegetable oil), чи синтетичне паливо (GTL, gas-to-liquid). Цей факт пов'язаний зі складом палива – чим вищий вміст кисню, тим нижча температура згоряння палива. Найвищий вміст кисню містить біодизель, тоді як в хімічному складі HVO немає кисню. Крім того, паливо з високою в'язкістю, таке як біодизель, має більш високу витрату палива, ніж менш в'язкі альтернативи, такі як GTL. На рис. 2 [4, с. 6] зображено вплив зміни різних властивостей альтернативних ДП: в'язкості (Viscosity), цетанового числа (CN), густини (Density), об'ємної теплоти згоряння (NCVvol)/ масової теплоти згоряння (NCVmass), кількості кисню (Oxygen) на відносну зміну витрати палива (Fuel consumption).

Представимо формулу (1) в наступному вигляді:

$$\alpha_{FC} = -1.075\Delta\rho - 0.076\Delta CN - 1.113\Delta H, \quad (3)$$

де  $\Delta\rho$  – відносна зміна густини;  $\Delta CN$  – відносна зміна цетанового числа;  $\Delta H$  – відносна зміна нижчої теплоти згоряння альтернативного палива відносно ДП.

### 3. Моделювання годинної витрати палива

Моделі, що представлені Рів. (1) та Рів. (3), приведені для питомої витрати палива (BSFC, Brake Specific Fuel Consumption). BSFC – це відношення масової витрати палива до ефективної потужності. Практичне значення також мають моделі годинної витрати палива, одна із таких моделей представлена в роботі [9, с. 2]. Годинну витрату палива можна знайти, (л/год):

$$G_f = \frac{q_e N_e}{1000 \Delta\rho_f}, \quad (4)$$

де  $q_e$  – ефективна питома витрата палива, г/(кВт год);  $N_e$  – ефективна потужність двигуна, кВт.

Ефективна питома витрата палива:

$$q_e = \frac{3600 \cdot 10^3}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot H_n}, \quad (5)$$

де  $H_n$  – теплота згоряння палива, кДж/кг;  $\eta_e = \eta_i \eta_m$  – ефективний ккд.

$$\eta_i = \frac{P_i L_0 R T}{H_n \eta_v P} \alpha, \quad (6)$$

де  $P_i$  – середній індикаторний тиск, кПа;  $L_0$  – стехіометрична кількість паливно-повітряної суміші, кмоль/кг;  $R$  – універсальна газова постійна,



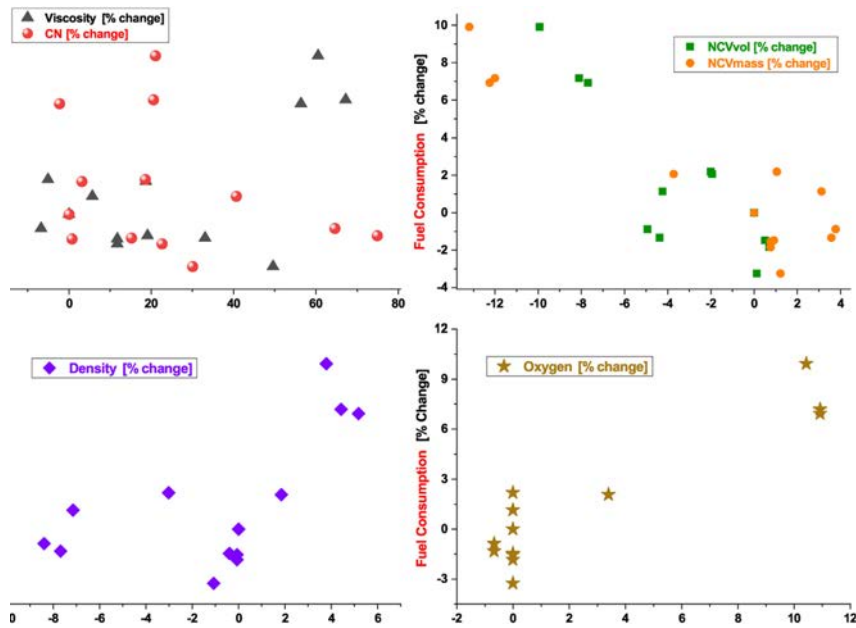


Рис. 2. Залежність витрати палива від властивостей альтернативних ДП [4, с. 6]

Дж / (моль К);  $T$  – температура повітря, К;  $\eta_v$  – коефіцієнт заповнення циліндрів двигуна;  $P$  – тиск повітря, кПа;  $\alpha$  – коефіцієнт надміру повітря.

Середній ефективний тиск, згідно [9, с. 2]:

$$P_e = \frac{N_e \cdot 30 \cdot \tau \cdot 10^3}{V_h \cdot n}, \quad (7)$$

де  $\tau$  – цикл двигуна;  $V_h$  – робочий об'єм двигуна (всі циліндри), л;  $n$  – частота обертання двигуна, об/хв.

Годинна витрата палива, коли  $N_e = 0$  [9, с. 5], (л/год):

$$G_f = \frac{0.12 \cdot P \cdot V_h \cdot n \cdot B_{\eta}}{L_0 \cdot R \cdot T \cdot \tau \cdot C_{\alpha} \rho_f}, \quad (8)$$

де  $B_{\eta}$  та  $C_{\alpha}$  – коефіцієнти, що залежать від типу двигуна.

З врахуванням густини дизельного палива, ( $\rho_f = 0.84 \text{ г/см}^3$ ) та ( $L_0 = 0.495 \text{ кмоль / кг}$ ,  $B_{\eta} = 1, C_{\alpha} = 5$ ), будемо мати [9, с. 5]:

$$G_f = 0.00174 \cdot V_h \cdot P / T \cdot n. \quad (9)$$

Для автомобіля Skoda Octavia 1.9 TDI ( $V_h = 1,9$  л і  $n = 600$  об / хв) на основі формули (9) одержуємо годинну витрату для дизельного палива:

$$G_f = 0.00174 \cdot 1.9 \cdot 0.346 \cdot 600,$$

що дає значення 0.686 л/год (0.673 л/год в [9, с. 5]).

Для автомобіля Skoda Octavia з дизельним двигуном потужністю 66 кВт встановлена базова норма витрати дизельного палива 5,2 л / 100 км [9, с. 6]. Експериментальні дослідження [9, с. 6] показали, що витрата дизельного палива на холос-

тому ходу для Skoda Octavia 1,9 TDI – 0,6 ... 0,7 л / год, що узгоджуються з розрахунками.

Бази даних WLTP [10, с. 1] містять інформацію по витраті палива нових автомобілів, що вироблені у Великобританії. WLTP розділений на 4 частини, в якій ТЗ має різну максимальну швидкість: низька (Low), до 56,5 км/год; середня (Medium), до 76,6 км/год; висока (High), до 97,4 км/год; надвисока (Extra-high), до 131,3 км/год.

Таку ж потужність, 66 кВт, як в автомобіля Skoda Octavia, витрата палива, якого розрахована в роботі [9, с. 6], має автомобіль Рено. На рис. 1 показано WLTP Metric, чотирьох автомобілів Рено з потужністю 66 кВт та двох автомобілів потужністю 70 кВт (Renault\_70), що використовує дизельне паливо. Інформація одержана з бази даних WLTP [10, нові автомобілі, записи 3215-3220].

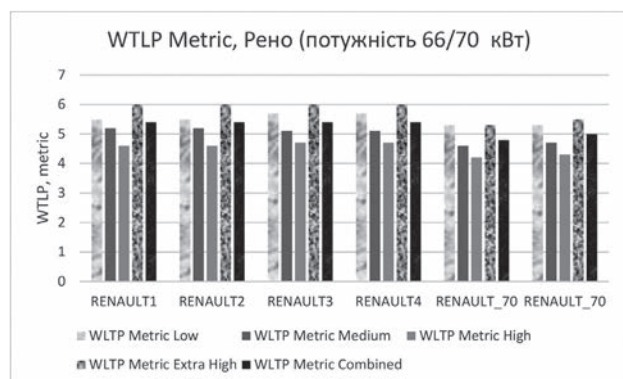


Рис. 3. WLTP Metric, автомобіль Рено, що використовує дизельне паливо (потужність 66/70 кВт)

Середня витрата палива для автомобіля Рено (metric medium) складає 5.1–5.2 л/100 км, в залежності від моделі. За комбінованим показником всі автомобілі потужністю 66 кВт мають однакову витрату палива 5.4 л/100 км.

#### 4. Розрахунки відносної витрати палива (BSFC) для біодизеля та HVO

Розрахуємо відносну зміну у властивостях біодизеля та відновлювального палива (HVO), користуючись (2) та відносну зміну витрати палива за (1), використовуючи дані табл. 1 та табл. 2.

За даними таблиці 2 та користуючись формулою (1) одержали зміну у витраті палива HVO відносно ДП, що дорівнює 1.68%. Потрібно звернути увагу на той факт, що дизельне паливо містить 7% біодизельного палива. Як видно з таблиці 3, використовуючи Рів. (1), у випадку використання HVO і суміші EN 590-30, що містить 30% HVO, одержано дуже близьке значення витрати палива двох палив до ДП.

В таблиці 4 показані відносні зміни властивостей різних альтернативних палив разом з відносними значеннями витрати палива, порашованими за (1) і також експериментальними даними, що взяті з роботи [4, с. 8].

#### 5. Розрахунки годинної витрати палива для біодизельного палива.

Для знаходження годинної витрати палива потрібно знати стехіометричну кількість повітря для палива, яку можна визначити за формулою (кмоль/кг) [11, с. 30]:

$$L_0 = \frac{C / 12 + H / 4 - O / 32}{0.21}, \quad (10)$$

де  $C$ ,  $H$  і  $O$  – масові частки в паливі відповідно вуглецю, водню і кисню.

Формула дає значення 0.44 кмоль/кг для біодизельного палива [11, с. 35].

Для біодизеля, взявши до уваги густину цього палива 0.88 г/см<sup>3</sup> і  $L_0 = 0.44$  кмоль/кг, одержуємо:

$$G_f = 0.00187 \cdot V_h \cdot P / T \cdot n. \quad (11)$$

Таблиця 1

Залежність витрати палив від властивостей палива

Властивість	Розмірність	ДП*	Біодизель	$C(X_R)$ , %
Густина, 20°C	кг/м <sup>3</sup>	826	877	6.17
Цетанове число	–	45	51	13.33
Теплота згоряння	МДж/кг	42.5	37.5	-11.8
Зміна витрати палива (1)	%		5.44	

\* Характеристики дизельного (ДП) і біодизельного палив взяті з роботи [11, с. 63].

Таблиця 2

Залежність витрати палив HVO від властивостей палива

Властивість	Розмірність	ДП	HVO	$C(X_R)$ , %
Вміст біодизеля в паливі	% об'єм/об'єм	7.0		
Густина, 60°C	кг/м <sup>3</sup>	832.4	778.7	-6.45
Цетанове число	–	56.5	76.3	35.04
Теплота згоряння	МДж/кг	43	44	2.32
Зміна витрати палива (1)	%		1.68	

Таблиця 3

Залежність витрати палив HVO від властивостей палива

Властивість	Розмірність	EN 590	HVO	EN 590-30
Густина (15°C)	кг/м <sup>3</sup>	843.0	779.7	824.0
Цетанове число		54.6	70	65
Теплота згоряння,	МДж/кг	45.99	47.27	46.35
Зміна витрати палива (1)	%		-0.092	0.104

Таблиця 4

Відносна зміна характеристик палив та витрати палива

Паливо	$\Delta CN$ , %	$\Delta \rho$ , %	В'язкість, % зміни	$\Delta H$ , %	$\alpha_{FC}$ %, експер. %	$\alpha_{FC}$ (1), (3), %
B100	20.53	4.43	67.28	-12.01	7.18	7.04
B100	21.03	3.79	60.56	-13.2	9.92	9.01
GTL100	64.58	-8.4	-6.77	3.77	-0.88	-0.07

Розрахунок за формулою (11) дає значення витрати палива для біодизеля 0.738 л/год, що у порівнянні 0.686 л/год для ДП, дає відносне збільшення витрати біодизельного палива 7.47%, в порівнянні з формулою (1) – 6.96%. В таблиці 5 показані властивості біодизельного палива та ДП згідно [5, с. 139], а також параметри, які потрібні для розрахунку витрати палива.

В таблиці 6 показано порівняння властивостей альтернативних палив RME та GTL з дизельним паливом ULSD. Властивості палива взяті з роботи [12, с. 624]. GTL має більшу теплоту згоряння, ніж дизельне паливо ULSD та біодизельне паливо RME, а також набагато більше цетанове число.

Для палива GTL взявши до уваги густину цього палива  $0.7864 \text{ г/см}^3$  та  $L_0 = 0.516 \text{ кмоль/кг}$ , одержуємо відносну зміну палива відносно базового ДП (ДП2), що пораховане за формулою (8) – 0.025%. Відносно базового палива ULSD одержуємо відносну зміну витрати GTL 2.730%, це пов'язано з меншою густиною дизельного палива ULSD у порівнянні з дизельним паливом ДП2.

Отже, розрахунки також показали, що ефективна питома витрата палива ( $\text{кг}/(\text{кВт} \times \text{год})$ ) буде більшою для біодизельного палива, ніж для ДП, а для синтетичного палива GTL і HVO меншою, ніж для ДП, або ж майже незмінною. Важливо також зрозуміти залежність витрати палива не тільки від густини, але й від в'язкості палива.

Експериментальні дані [13, с. 63] показують, що залежність циклової витрати палива ( $\text{г/хід}$ ), ( $\text{г/км}$ ) від густини для трьох різних видів палив була близька до лінійної. В той же час, трьохкомпонентне альтернативне паливо, що мало таку ж саму в'язкість, як і дизельне паливо, мало більшу витрату палива, причому трьохкомпонентне паливо мало більшу густину. Залежність витрати альтернативних дизельних палив від в'язкості палива може бути темою наступних досліджень.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** В роботі проаналізовано моделі витрати палива для альтернативних дизельних палив: дизельного біопалива, відновлювального дизельного палива (HVO) та синтетичного палива (GTL). Як моделювання, так і експериментальні дані показали, що біодизельне паливо має більшу витрату палива, а GTL та HVO – меншу витрату, ніж дизельне паливо. Збільшення цетанового числа і теплоти згоряння приводить до зменшення витрати палива. Збільшення густини палива має тенденцію збільшувати витрату палива ТЗ, оскільки це збільшує розміри крапель під час розпилювання і тим самим погіршує розпилювання палива. Хоча моделювання відносної витрати альтернативного дизельного палива показує гарне співпадіння з експериментальними даними, але потрібно більше експериментальних даних, для того щоб врахувати точніше вклад густини палива у його витрату.

Таблиця 5

## Властивості палив і результати розрахунків

Властивість	Розмірність	ДП1	БД	ДП2	БД
Густина	$\text{кг/м}^3$	860.0	880.0	840	880
Теплота згоряння	$\text{МДж/кг}$	42.5	37.5	42.5	37.5
*Цетанове число	–	45	51	45	51
$N_e$	$\text{кВт}$	204	233		
$L_0$	$\text{кмоль/кг}$	0.495	0.44	0.495	0.44
Зміна витрати палива (1)	%		9.58		6.96
Витрата палива, Skoda (9)	$\text{л/год}$			0.686	0.738
Зміна у витраті палива (9)	%				7.58

\*[11, с. 63]

Таблиця 6

## Властивості палив і результати розрахунків

Властивості	Розмірність	ULSD [12]	RME [12]	GTL [12]
Густина, 15°C	$\text{кг/м}^3$	827.1	883.7	786.4
Кінематична в'язкість, 40°C	$\text{мм}^2/\text{с}$	2.467	4.478	3.497
Нижча теплота згоряння	$\text{МДж/кг}$	42.7	37.4	43.9
Цетанове число		53.9	54.7	80
Ароматичні вуглеводи	% ваги	24.4	~	0.3
O	% ваги	~	10.8	~
C	% ваги	86.5	77.2	85.0
H	% ваги	13.5	12.0	15.0
FC (1)	%		6.345	-1.518
$L_0$	$\text{кмоль/кг}$	0.504	0.433	0.516

Список літератури:

1. Folkson R. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance (Second Edition). Towards Zero Carbon Transportation.* Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier, 2022. P. 1 – 16.
2. Колодницька Р.В. Моделювання витрати палива для автомобільного транспорту з врахуванням транспортних технологій. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. Вип. 33 (72) № 2. С. 201–208.
3. McCarthy P., Rasul M.G. and Moazzem S. Comparison of the performance and emissions of different biodiesel blends against petroleum diesel. *International Journal of Low-Carbon Technologies.* 2011. № 6. P. 255–260.
4. Kroyan Y., Wojcieszek M., Kaario O., Larmi M., Zenger K. Modeling the end-use performance of alternative fuels in light-duty vehicles. *Energy.* 2020. № 205. P. 117854.
5. Колодницька Р.В. Процеси випаровування та згоряння дизельного біопалива у двигунах внутрішнього згоряння: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2018. 192 с.
6. Fuel Consumption and CO<sub>2</sub>. London, 2021. URL: <https://www.vehicle-certification-agency.gov.uk/fuel-consumption-co2/> (дата звернення: 20.03.2023).
7. Dimitriadis A, Natsios I, Dimaratos A, Katsaounis D, Samaras Z, Bezergianni S and Lehto K. Evaluation of a Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Effects on Emissions of a Passenger Car Diesel Engine. *Front. Mech. Eng.* 2018. № 4. P. 7.
8. Aatola, H., Larmi, M., Sarjovaara, T., and Mikkonen, S. Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO<sub>x</sub>, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy-Duty Engine. *SAE Int. J. Engines.* 2009. № 1(1). P. 1251-1262.
9. Krivoshepov S. I. et al. Calculation methods for determining of fuel consumption per hour by transport vehicles. IOP Conf. Series. *Mater. Sci. Eng.* 2020. 39772004. doi:10.1088/1757-899X/977/1/012004.
10. Vehicle Certification Agency. Car fuel data, CO<sub>2</sub> and vehicle tax tools. London, 2021. URL: <https://carfueldata.vehicle-certification-agency.gov.uk/> (дата звернення: 20.03.2023).
11. Грабар І.Г., Колодницька Р.В., Семенов В.Г. Біопалива на основі олій для дизельних двигунів: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2011. 152 с.
12. Tira H.S., Herreros J.M., Tsolakis A., Wyszynski M.L. Characteristics of LPG-diesel dual fuelled engine operated with rapeseed methyl ester and gas-to-liquid diesel fuels. *Energy.* 2012. No. 47. P. 620 – 629.
13. Говорун А.Г., Павловський М.В., Куций П.В. [та ін.]. Оцінка паливної економічності та екологічних показників автомобіля в режимах Європейського їздового циклу, за роботи на штатному та сумішевих біодизельних паливах. *Вісник Національного транспортного університету.* 2012. № 25. С. 61 - 64.

**Kolodnytska R.V. FUEL CONSUMPTION MODELLING FOR ALTERNATIVE DIESEL FUELS OF AUTOMOBILE TRANSPORT**

*Worldwide, about 80 million vehicles were produced in 2020. Reducing fuel consumption from road transport is one of the key problems of today. To reduce fuel consumption, you need to reduce the costs associated with the movement of the car on the road and through the air. To do this, reduce the weight of the car, reduce aerodynamic drag, increase rolling resistance and reduce friction. But 90% of fuel savings depend on the propulsion system. Alternative diesel fuel has different physical properties, spray, evaporation and combustion than diesel fuel. The application of diesel fuel consumption models to alternative fuels does not always give the correct result. The article is aimed at analyzing fuel consumption models when applied to alternative diesel fuels, including biodiesel. The paper analyzes fuel consumption models for both specific consumption and hourly fuel consumption when applied to alternative diesel fuels: biodiesel (diesel biofuel), renewable diesel fuel (HVO), and synthetic fuel (GTL). As a rule, lower fuel consumption of a car is associated with a higher energy content in this fuel, that is, with the heat of combustion. Fuels having a higher cetane number usually result in lower fuel consumption. The density affects the injection into the internal combustion engine, with increasing fuel density, the droplet sizes increase and fuel atomization worsens, which, as a rule, leads to an increase in fuel consumption. Both simulations and experimental data have shown that biodiesel has higher fuel consumption and GTL and HVO have lower consumption than diesel. The influence of fuel properties, namely density, cetane number and calorific value on fuel consumption, is shown. Although modeling the relative consumption of alternative diesel fuel from the models under consideration shows good coincidence with experimental data, more experimental data are required in order to take into account more accurately the contribution of fuel density to its consumption. The dependence of the consumption of alternative diesel fuels on the fuel viscosity may be the topic of further research.*

**Key words:** road transport, fuel consumption, alternative fuel, diesel biofuel, biodiesel, HVO.

**Мельник О.М.**

Одеський національний морський університет

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ТА МАНЕВРУВАННЯ СУДНА НА БЕЗПЕКУ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Швидкість судна як і його маневреність має значний вплив на безпеку експлуатації. Оскільки швидкість знаходиться в залежності від часу, це визначає реакцію на можливі небезпеки та здійснення маневрів щодо розходження з іншими суднами, навігаційними небезпеками, тощо. Збільшення швидкості також підвищує ризик зіткнення або пошкодження судна в разі аварії. Маневреність судна має вирішальне значення для безпеки з приводу того, що судно з високими маневреними якостями здатен швидко змінювати напрямок свого руху та уникати небезпечного зближення або загрози зіткнення, тоді як низькі маневрені якості суден обумовлюють труднощі які виникають в процесі ухилення від перешкод або зміни курсу, що може спричинити за собою ризик зіткнення або пошкодження судна. Дослідження чинників, що впливають на параметри руху і маневрування судна є достатньо актуальною темою, Питання, що пов'язані зі зміною ступеня керованості морських суден в різних умовах експлуатації та врахування принципів зміни гідродинамічних реакцій, що діють на корпус судна з боку рідини, її в'язкісної та природи хвилювання завжди потребують певної уваги. Сили які створюють відповідні складові опору на судно, змінюють його ходову осадку і диферент у комплексі мають вирішальне значення для безпечної експлуатації суден. Незалежно від сфери діяльності, будь то проектування і будівництво суден, морська інженерія або судноводіння, поліпшення маневрених характеристик судна має важливе значення для забезпечення його ефективної керованості. У цій статті пропонується обговорення фундаментальних принципів, які регулюють рух судна, включаючи сили і базові основи остійності які на нього впливають. Пропонується аналіз новітніх технологій та розробок сприяючих покращенню керованості та інерційних якостей суден та тенденції розвитку перспективних інновацій в суднопластві.*

**Ключові слова:** морський транспорт, морське перевезення вантажів, безпека суднопластва, швидкісні та маневрені характеристики, керування судном, остійність, системи стабілізації, хита-виця, складові руху судна, попередження зіткнення.

**Актуальність роботи.** Розуміючи комплекс проблем, які можуть виникнути під час руху судна, штурманський склад може ухвалювати обґрунтовані рішення для забезпечення безпеки та ефективності керування судном, особливо в несприятливих погодних умовах. Вивчення і дослідження динаміки руху водотоннажних об'єктів продовжує розвиватися в процесі розроблення нових технологій і матеріалів, і залишається найважливішим напрямом уваги для проектувальників, інженерів і експлуатантів сучасних суден.

Існує безліч технологій, що покращують маневрені характеристики суден, вони включають в себе використання стабілізаторів, оптимізація баластування та завантаження, планування маршруту, зниження швидкості і, безумовно, шляхом навчання членів екіпажу спеціальним навичкам. Приймаючи до уваги зазначені заходи, підвищується і безпека експлуатації судна, і безпека, і комфорт екіпажу, й пасажирів, а також ефективність транспортних операцій судна.

**Матеріал і результати досліджень.** Дослідження чинників впливу на маневреність та швидкісні характеристики судна важливі для розуміння його поведінки у воді та пошуку шляхів покращення. Форма корпусу, пропульсивна система та ступінь завантаження судна є основними чинниками, що впливають на ці характеристики. Ці дані можуть бути корисними для розробки та проектування нових суден, а також для покращення експлуатації та безпеки існуючих. Важливі чинники, які впливають на маневреність та швидкість судна, включають форму корпусу, розташування та тип рушії, довжину та ширину судна, глибину води, стан силової установки та технічне її обслуговування, навички екіпажу та погодні умови. Для забезпечення безпеки на водному транспорті, дослідження цих чинників може допомогти виявленню та попередженню можливих проблеми з маневреністю та швидкістю судна та забезпечити безпеку екіпажу, судна та вантажу.

Вплив параметрів руху та маневрування судна на безпеку його експлуатації включає такі аспекти (табл. 1):

## Вплив параметрів руху судна на безпеку експлуатації

Параметри	Вплив на безпеку експлуатації
Швидкість судна	Висока швидкість може збільшити ризик аварій та ускладнити контроль над судном. Неправильне використання великої швидкості може спричинити зіткнення з іншими суднами, затонування, пошкодження структури судна та інші небезпеки
Керованість судна	Ефективна керованість судна є критичною для безпеки його експлуатації. Погана маневреність може ускладнити уникнення перешкод, виконання маневрів у вузькостях, реагування на непередбачувані ситуації та уникнення аварій.
Діаметр циркуляції	Надмірне значення може обмежувати можливості маневрування судна, особливо в умовах обмеженого простору, портових акваторій або при виконанні маневрів по розходженню з іншими суднами. Обмежена маневреність може призвести до зіткнень та інших аварійних ситуацій.
Час реакції на небезпеки	Швидка реакція екіпажу на зміну ситуації є важливою для безпеки судна. Довгий реакційний час може спричинити затримку в виконанні маневрів, неправильну реакцію на загрозу або неспроможність уникнути аварійної ситуації.
Остійність судна	Недостатня остійність судна може призвести до виникнення небезпечного крену, загрози перекидання, що в підсумку загрожуватиме безпеці екіпажу, судна та вантажу.
Інерційні якості судна	Інерційні властивості судна є важливим фактором в експлуатації судна. Аварії суден часто є наслідком поганого знання та врахування судоводіями інерційних якостей суден.
Дистанція до інших суден та перешкод	Відстань між суднами та іншими перешкодами має велике значення для безпеки. Недотримання безпечної дистанції може призвести до зіткнень, посадки на міліну, контакт з іншими перешкодами, а також до ускладнення маневрування та реагування на небезпеку.
Вплив погодних умов	Погодні умови, такі як сильний вітер, хвилі або туман, можуть значно погіршити безпеку експлуатації судна. Вони можуть впливати на маневреність, видимість, остійність та інші аспекти безпеки

Аналіз впливу цих параметрів руху та маневрування судна на безпеку його експлуатації є важливим для розробки ефективних стратегій безпеки та покращення процесів морської логістики.

Розуміння принципів руху судна є важливим завданням з точки зору аналізу та контролю маневреності та безпеки експлуатації судна. Кожен вид хитавиці відповідає певному рухові судна, що може виникати під час плавання. Це дає можливість детально вивчати та аналізувати рухи судна в різних площинах та напрямках та дозволяє розуміти, які рухи можуть виникати під час маневрування та впливати на безпеку судна допомагає вживати відповідних заходів безпеки для забезпечення надійності та ефективності процесу перевезень.

Судно, у загальному випадку, має шість ступенів свободи. Відповідно, розрізняють шість видів хитавиці: три обертальних – бортова, кильова і рискання, і три зворотно-поступальних – вертикальна, поздовжня, поперечна. Вертикальну хитавицю або вертикальний рух судна (heave), тоді як хитавиця (sway) – це бічний рух з боку в бік. Поздовжній рух судна (surge), а крен (pitch) – рух навколо поздовжньої осі. Рух навколо поперечної осі (roll) та рискання судна тобто рух навколо вертикальної осі (yaw).

Існує кілька сил, які впливають на рух судна, зокрема сила тяжіння, сила плавучості, гідродинамічна сила і сила вітру. Сила тяжіння – це вага

судна, що діє вертикально вниз. Сила плавучості – це висхідна сила, що діє на судно через витіснену воду. Гідродинамічна сила – це сила, яку чинить вода на корпус судна внаслідок його руху, а сила вітру – сила, яку чинить вітер на надбудову судна.

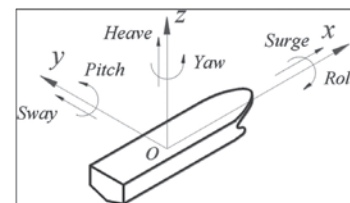


Рис. 1. Системи відліку руху судна

За допомогою кількох виразів можна описати вплив гідродинаміки на корпус судна, наприклад обчислити опір судна, в момент руху, що зумовлений силою тертя води об корпус судна та хвильовим опором, що створюється при русі судна:

$$R = k V^2 \times S \quad (1)$$

де:  $R$  – опір (тс),  $k$  – коефіцієнт, який залежить від форми корпусу,  $V$  – швидкість судна (вуз.),  $S$  – площа змоченої поверхні корпусу ( $m^2$ ).

Формула числа Фруда як безрозмірного числа, описує відносну важливість сил інерції до сил гравітації в потоці рідини. У разі досягнення судном швидкості, що дорівнює критичній швидкості поширення хвилі, число Фруда дорівнює одиниці, чим інтенсивніше хвилюєтворення, тим більше число Фруда:

$$Fr = V / \sqrt{gL} \quad (2)$$

де  $Fr$  – число Фруда,  $V$  – швидкість судна (вуз.),  $g$  – прискорення під дією сили тяжіння ( $m/c^2$ ),  $L$  – довжина ватерлінії судна (м).

Формула числа Рейнольдса, також безрозмірне число, яке описує відносну важливість сил в'язкості до сил інерції в потоці рідини. Для судна воно задається формулою:

$$Re = \rho \times V \times L / \mu \quad (3)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса,  $\rho$  – густина рідини ( $kg/m^3$ ),  $V$  – швидкість судна (вуз.),  $L$  – довжина корпусу ( $\mu$  – в'язкість рідини).

До речі хвилеутворююча формула Кельвіна також описує хвильову картину, що створюється судном під час руху у воді, задається наступним:

$$h = (B/2p) \times \sqrt{(L/2p)} \times (1/2) \times (V/\sqrt{g}) \quad (4)$$

де  $h$  – висота хвиль, що створюються судном (м),  $B$  – ширина судна (м),  $L$  – довжина ватерлінії судна (м),  $V$  – швидкість руху судна (вуз.),  $g$  – прискорення під дією сили тяжіння ( $m/c^2$ ).

Одна з можливих узагальнюючих формул впливу гідродинамічних сил на корпус судна виглядає наступним чином:

$$Fh = \rho_v \times \oint S (v_n - v_s) \times (v_n - v_s) \times dS \quad (5)$$

де  $F_h$  – гідродинамічна сила, що діє на корпус,  $\rho_v$  – густина рідини (наприклад, морської води),  $\oint S$  – поверхневий інтеграл за площею змоченої поверхні корпусу,  $v_n$  – швидкість рідини відносно корпусу по нормалі до поверхні,  $v_s$  – швидкість рідини відносно корпусу по дотичній до поверхні і  $v_r$  – швидкість корпусу відносно рідини.

Фізичні аспекти руху судна враховують складну взаємодію між рідиною і корпусом судна, включаючи вплив форми і орієнтації корпусу, в'язкість і густину рідини, а також відносний рух корпусу і рідини тому інтеграл по площі змоченої поверхні враховує той факт, що потік рідини навколо корпусу судна є нерівномірним, а доданок  $(v_n - v_s) \times (v_n - v_s)$  фіксує сили зсуву і тиску, які сприяють гідродинамічному опору судна.

Аналіз різних параметрів, пов'язаних з рухом судна дозволяє обчислити опір руху судна у воді, враховуючи форму корпусу, швидкість та площу змоченої поверхні та допомагає визначити режим руху рідини навколо судна і враховувати його вплив на опір та поведінку судна, обчислення швидкості поширення хвиль у воді і допомагає аналізувати хвильові процеси та їх вплив на судно.

Остійність судна – важливий аспект, що передбачає здатність судна зберігати рівновагу оскільки коли воно рухається, на нього діє низка сил, таких як вітер, хвилі та течії, які можуть спричинити

крен, диферент або рискання. Підтримка остійності має вирішальне значення для безпеки судна тому окрему увагу в процесі його руху тобто здатності судна залишатися у вертикальному положенні і протистояти перекиданню після припинення дії зовнішніх сил. На остійність судна впливають кілька факторів, зокрема центр ваги судна (G), центр плавучості (B) і метацентр (M). Коли судно нахилиється, центр плавучості рухається по дузі, продовжуючи таким чином нібито шукати геометричний центр підводної частини корпусу. Ця дуга описує метацентричний радіус. Коли центр плавучості переміщується вгору, метацентр переміщується вниз. І навпаки коли центр плавучості рухається вниз, метацентр рухається вгору. Точка (G) – це точка, де вага судна вважається зосередженою, в той час як точка (B) – це точка, де діє сила плавучості. Точка, в якій перетинаються центр ваги і центр плавучості судна називається метацентром. Центр плавучості рухається в тому ж напрямку, що і ватерлінія судна тому положення точки (G) відносно точки (B) і метацентру має вирішальне значення для визначення остійності судна.

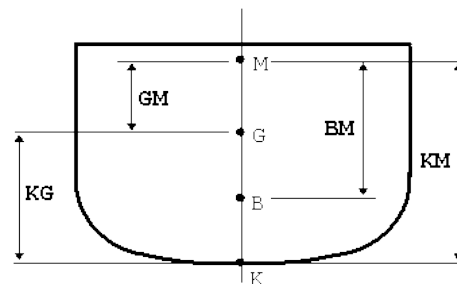


Рис. 2. Лінійні вимірювання остійності

Деякі базові лінійні вимірювання такі як висота центру ваги (KG) судна над кілем міститься в розділі буклету остійності судна що обов'язково повинен бути борту кожного судна для декількох умов завантаження. Наприклад щоб знайти "KG" для умов завантаження, відмінних від тих, що вказані в буклеті остійності, необхідно виконати розрахунки висоти метацентру над кілем (KM) який знаходять за допомогою гідростатичних таблиць і кривої водотоннажності та елементів теоретичного креслення, розташованих в даних про остійність судна. Метацентрична висота (GM) обчислюється шляхом віднімання KG від KM тобто  $(GM = KM - KG)$ , і є мірою початкової остійності судна. Відстань між центром плавучості і метацентром є метацентричним радіусом (BM) і є фактично радіусом кола для рухів "B" при малих кутах нахилу.

Не менш важливим фактором, що впливає на остійність судна, є ефект вільної поверхні. Коли рідина може вільно рухатися у відсіку, наприклад, у баластній цистерні або вантажному трюмі, вона може зміщуватися і впливати на остійність судна. Щоб протидіяти цьому ефекту, судна обладнують перегородками та резервуарами, що запобігають перекиданню.

Вочевидь що рух судна це складне і динамічне явище, яке може спричинити низку проблем, що впливають на продуктивність і безпеку судна тому слід обумовити деякі з найпоширеніших проблем, які можуть виникнути під час руху судна, і способи їх вирішення. Надмірний крен також серед поширених проблем, яка може спричинити небезпеку та напруження у корпусі судна, пошкодити вантаж і порушити остійність судна. Зазвичай таке явище спричиняється хвилювним впливом, який може виникнути під час руху судна в складних погодних умовах. Небезпечною є повздожня хитавиця яка виникає, коли носова і кормова частини судна по черзі піднімаються і опускаються, внаслідок хвилювання. Для вирішення даної проблеми судна можуть бути обладнані пристроями, тобто стабілізаторами, які являють собою плавники або ротори, встановлені нижче ватерлінії, змонтовані на корпусі або системами активного демпфування.

Синхронна хитавиця також небезпечне явище для судна, яке може виникнути, коли власна частота руху судна синхронізується з частотою хвиль. Це може призвести до значного збільшення амплітуди хитавиці, що в свою чергу може поставити під загрозу остійність судна і спричинити пошкодження вантажу. Для вирішення цієї проблеми судна можуть бути обладнані пасивними або активними пристроями, які можуть зменшити амплітуду хитавиці судна.

Параметрична хитавиця – специфічний тип, який може виникати на суднах з певною формою корпусу і високою швидкістю руху. Він виникає, коли крен судна поєднується з поздожнім рухом судна і може призвести до швидкого збільшення амплітуди крену. Під загрозою опиняється остійність судна і цілісність вантажу. Для вирішення цієї проблеми судна можуть бути обладнані активними пристроями проти хитавиці, такими як плавники або баластні системи, які можуть протидіяти такому явищу.

Повільний дрейф може виникнути, коли судно рухається проти течії або зустрічного вітру. Він може призвести до відхилення судна від наміченого курсу, так зване рискання. Для вирішення цієї

проблеми судна можуть бути обладнані рушіями або системами динамічного позиціонування, які можуть утримувати місцеположення і курс судна.

Існує кілька негативних факторів, які можуть вплинути на рух судна, зокрема жорстке хвилювання що може викликати розгойдування судна, що призводить до потенційної небезпеки для екіпажу, судна та вантажу. Поривчатий вітер також може спричинити розгойдування або навіть перекидання судна, залежно від напрямку та інтенсивності вітру. Сильні течії можуть спричинювати знос судна, ускладнюючи процес керування і контроль за його утриманням на курсі. У холодному кліматі на корпусі судна може утворюватися лід, що також впливає на його швидкість і маневреність та остійність. Будь-яка механічна поломка або несправність в технічних системах, головному двигуні або рульових системах судна може призвести до непередбачуваних і небезпечних наслідків. Окрім цього некоректне завантаження судна та баластування має свої негативні наслідки. Якщо баластні цистерни судна не заповнені повністю або більш ніж 95%, це може вплинути на остійність судна і сприяти його схильності до надмірної хитавиці.

Як зазначено на рух судна впливають хвилі, вітер, течії та інші зовнішні чинники тому важливо вживати заходів для поліпшення його руху, які можна вжити для зменшення хитавиці і підвищення безпеки наприклад стабілізатори, які можуть бути встановлені на судні для зменшення хитавиці. Існує два типи стабілізаторів: пасивні та активні. Пасивні стабілізатори працюють за рахунок збільшення опору щодо хитавиці судна, тоді як активні стабілізатори, використовуються гідравлічні або пневматичні системи, для протидії хитавиці судна. До пасивних стабілізаторів відносяться так звані заспокоювачі, які являють собою довгі пластини, прикріплені до корпусу судна, і плавники, які схожі на крила літака і встановлені на бортах судна. Активні стабілізатори включають гіроскопічні стабілізатори, для створення протидіючої сили, і гідравлічні стабілізатори, які використовують гідравлічні насоси для встановлення плавників або інших пристроїв для протидії хитавиці. Гіроскопічні заспокоювачі це потужні гіроскопи, які обертаються в спеціальній рамі, а під час бортових хитавиць відбувається поворот осі гіроскопа, внаслідок чого виникає так званий «гіроскопічний момент», що допомагає стабілізувати судно та усунути бортову хитавицю навіть до 95%. Вони знайшли своє поширення як на маломірних суднах, так і на крупнотоннажних



однак і вартість такого обладнання дуже висока. Робота заспокоювача повністю автоматизована й автономна, потрібно тільки ввімкнути або вимкнути пристрій, а також ознайомитися з графічним інтерфейсом дисплея, який розроблений зрозуміло і просто. Під час руху судна, на відміну від пасивних стабілізаторів, гіроскопічний заспокоювач хитавиці працює в постійному режимі за будь-якої швидкості руху судна, автоматично адаптуючись під амплітуду хитавиці.

Серед заходів що сприяють поліпшенню руху судна та покращенню його маневрених та швидкісних характеристик є коректне баластування судна що також здатне покращення його остійності. Коли судно порожнє, воно має тенденцію бути легким, з надлишковою парусністю та нестійким на заданому курсі. Оптимальне баластування знижує центр ваги судна, покращуючи його посадку та стабільність курсової стійкості. Ефективне планування маршруту має значний вплив на якість його руху. Штурманський склад повинен прокладати маршрут таким чином, щоб уникати зон з несприятливими погодними умовами або сильними течіями. Плануючи маршрут, з використанням сприятливих умов можна забезпечити фрахтову швидкість руху судна. Нарешті, підготовка екіпажу має важливе значення для покращення маневрених характеристик судна. Судноводії повинні мати відповідні компетенції та навички, як правильно експлуатувати суднове навігаційне обладнання та технічні системи, таке як стабілізатори та баласт, щоб оптимізувати остійність судна. Вони також повинні бути навчені тому, як реагувати на мінливі погодні умови і стан моря щоб уникнути непотрібних ризиків.

Судноплавна індустрія є життєво важливою частиною глобальної торгівлі, з'єднуючи країни і забезпечуючи транспортування товарів через океани. З розвитком технологій і мінливими вимогами галузі, майбутнє судноплавства є сферою постійних досліджень і розробок тому розглянемо деякі з останніх тенденцій і прогнозів щодо поліпшення швидкості руху суден у майбутньому. Однією з останніх тенденцій в дизайні суден є використання хвилепроникнених корпусів. Такі корпуси призначені для розсікання хвиль, зменшуючи опір води та покращуючи паливну ефективність. Форма цих корпусів схожа на форму торпеди, з вузьким носом, що звужується до корми. Така конструкція дозволяє судну більш плавно рухатися по воді, зменшуючи вібрації і роблячи морський перехід більш комфортним особливо для круїзних суден. Хвилепроникні

корпуси зменшують значення  $K$ , що призводить до меншого хвильового опору і кращої паливної ефективності. Формула для розрахунку хвильового опору ( $R_w$ ) виглядає наступним чином:

$$R_w = K \times \rho \times V^2 \times S \quad (6)$$

де:  $K$  – константа, яка залежить від форми корпусу,  $\rho$  – густина води ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $V$  – швидкість судна (вуз.),  $S$  – площа змоченої поверхні корпусу ( $\text{м}^2$ ).

Додатково на рух судна впливає багато факторів, зокрема хвилі, вітер і течії. Тому актуальними буде дати характеристику системам активної стабілізації, які використовують датчики і системи управління для регулювання стабільності руху судна і підвищення його стійкості на курсі. Ці системи можуть зменшити крен і хитавицю судна, покращуючи перехід судна в несприятливих погодних умовах більш небезпечним і знижуючи ризик пошкодження вантажу. Системи активної стабілізації працюють, контролюючи крен судна, регулюючи амплітуду і частоту крену, зменшуючи його значення. Нижче наведена формула описує рух судна відносно горизонтальної площини, зокрема кут крену. Вона використовується для моделювання і аналізу коливань судна та дозволяє оцінити рух судна та враховувати його вплив на остійність та безпеку плавання.

$$\theta = A \times \sin(\omega \times t + \varphi) \quad (6)$$

де:  $\theta$  – кут крену (град.),  $A$  – амплітуда руху бортового хитання (м),  $\omega$  – частота руху бортового хитання (м/с),  $t$  – час (с),  $\varphi$  – початковий фазовий кут (град).

Досягнення в галузі пропульсивних технологій також впливають на майбутні технології підвищення якості руху суден. Розробляється кілька інноваційних рушійних систем, таких як системи повітряного змащення, які створюють шар повітряних бульбашок навколо корпусу, щоб зменшити опір і підвищити ефективність використання палива. Інші рушійні системи, такі як магнітогідродинамічні рушії і осцилюючі плівки, також досліджуються на предмет їхнього потенціалу для підвищення ефективності руху суден. Однією з останніх тенденцій є використання електричних пропульсивних систем, які використовують електродвигуни для приводу гребних гвинтів. Ці системи є більш ефективними, ніж традиційні дизельні двигуни, і спричиняють менше забруднення. Вони також можуть поєднуватися з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі і вітрогенератори, щоб ще більше зменшити шкідливий вплив судноплавства на навко-

лише середовище. Удосконалені пропульсивні системи можуть зменшити опір судна і підвищити ефективність руху, що призводить до зниження енергоспоживання та зменшення споживання палива, де потужність ( $P$ ), необхідна для руху судна, виглядає наступним чином:

$$P = (D \times V) / \eta \quad (7)$$

де:  $D$  – опір корпусу судна ( $H$ ),  $V$  – швидкість судна (вуз),  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії рушія.

Існує ще декілька майбутніх тенденцій у покращенні якості руху суден, які зараз досліджуються і розробляються морською індустрією це діджиталізація. Очікується, що використання передових цифрових технологій в майбутньому зробить революцію в методах управління суднами адже системи, які інтегрують штучний інтелект в управління системами і комплексами використовуючи мережу сучасних датчиків, можуть допомогти підвищити точність навігації, оптимізувати споживання палива і підвищити загальну ефективність. Автономне судноплавство швидко стає реальністю,

і кілька компаній вже тестують і розгортають автономні технології судноплавства. Ці судна використовують передові алгоритми автоматизації для навігації та прийняття рішень, зменшуючи потребу у втручанні людини та підвищуючи безпеку.

**Висновки.** Результати отримані в даній статті підтверджують, що параметри руху та маневреність судна мають визначальний вплив на безпеку його експлуатації та ефективність перевезення вантажів. Аналіз взаємодії судна з рідиною дозволив розкрити значення інерційних сил на опір корпусу та маневреність судна. Дослідження факторів, що впливають на остійність судна, дозволяють моделювати рух з урахуванням амплітуди, частоти та початкового фазового кута що в підсумку підкреслює важливість врахування цих аспектів для забезпечення безпеки плавання, ефективного перевезення вантажів та оптимальної експлуатації судна. Подальше дослідження цієї теми може сприяти вдосконаленню технологій та стратегій управління судном з метою забезпечення його безпеки та ефективності експлуатації.

#### Список література:

1. de Winter, Roy. (2018). Designing Ships using Constrained Multi-Objective Efficient Global Optimization. 10.13140/RG.2.2.21395.12328.
2. Мельник О.М. Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства / О.А. Онищенко, А.О. Волошин, Н.В. Васалатій, О.В. Логінов, К.С. Корякін // Розвиток транспорту. – 2022. – № 3 (14) – С.179- 191. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13>.
3. Мельник О.М., Волошин А.О., Онищенко О.А., Щербина О.В., Васалатій Н.В., Никитюк П.В. Організація забезпечення інформаційної безпеки морського судна. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2022. – №201. – С. 69–78. DOI: 10.18664/1994-7852.201.2022.267758
4. Мельник О.М. Супутникові компаси у системі забезпечення безпеки навігації суден / О.М. Мельник, К.С. Корякін, О.В. Логінов // Розвиток транспорту. – 2022. – № 1 (12) – С.54- 63. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.05>.
5. Lian, Jijian & Wang, Haijun & Guo, Yaohua & Pengwen, Wang. (2023). Effects of damping plate on the motion response of transport ships under waves. Applied Ocean Research. 134. 10.1016/j.apor.2023.103507.
6. Li, Gaocai & Liu, Mingzheng & Zhang, Xinyu & Wang, Chengbo & Lai, Kee-hung & Qian, Weihua. (2022). Semantic Recognition of Ship Motion Patterns Entering and Leaving Port Based on Topic Model. Journal of Marine Science and Engineering. 10. 2012. 10.3390/jmse10122012.
7. Meyers, W. & Baitis, A.. (1985). SMP84: Improvements to Capability and Prediction Accuracy of the Standard Ship Motion Program SMP81. 100.
8. Suzuki, Ryosuke & Ueno, Michio & Tsukada, Yoshiaki. (2021). Numerical simulation of 6-degrees-of-freedom motions for a manoeuvring ship in regular waves. Applied Ocean Research. 113. 102732. 10.1016/j.apor.2021.102732.
9. Melnyk, O. Onyshchenko, S. (2022) Navigational safety assessment based on Markov-model approach. Scientific Journal of Maritime Research, 36 (2), 328-337. <https://doi.org/10.31217/p.36.2.16>
10. Мельник О.М., Онищенко О.А., Корякін К.С., Бурлаченко Д.А., Чеча О.П., Щенявський Г.С. (2023). Безекіпажне судноплавство як розвиток технологічних інновацій в морській галузі. Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Технічні науки. – 33 (72) № 5 – С. 299-304.

#### Melnyk O.M. ANALYSIS OF THE SHIP'S MOVEMENT AND MANEUVERING PARAMETERS INFLUENCE ON THE OPERATIONAL SAFETY

*The speed of a vessel, like its maneuverability, has a significant impact on operational safety. Since speed is time-dependent, it determines the reaction to possible obstacles such as ships, floating objects, navigational*

hazards, etc., so an increase in speed also increases the risk of collision and damage to the vessel in the event of an accident. Vessel maneuverability is also crucial for safety in that a vessel with good maneuverability can quickly change her course and avoid a collision, while poor maneuverability causes difficulties in evasive maneuvers or changing course, which can lead to a risk of collision or damage to the vessel. The study of the factors affecting the parameters of ship movement and maneuvering is a rather relevant topic, Issues related to changes in ship controllability in various operating conditions and understanding the principles of hydrodynamic reactions acting on the ship's hull from the fluid, its viscous and wave nature, as well as the forces that form the corresponding components of resistance in the direction of ship movement and change the running draft and trim in combination, are crucial for the safe operation of ships. Regardless of the field of activity, whether it is ship design and construction, marine engineering or ship navigation, improving the maneuvering characteristics of a ship is essential to ensure its efficient handling. This article offers a discussion of the fundamental principles that govern ship motion, including the forces and basic principles of stability that affect it. The article also analyzes the latest technologies and developments that contribute to the improvement of ship handling and inertial performance, as well as trends in the development of promising innovations in shipping.

**Key words:** maritime transport, safety of transportation, safety of navigation, speed and maneuverability characteristics, ship control, stability, stabilization systems, pitching, ship hull, ship motion, collision prevention.

УДК 656.21

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/26>

**Торопов Б.І.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Стрелко О.Г.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Грушевська Т.М.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Васілова Г.С.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Лигун Ю.Ю.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## **ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ І ТЕХНІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ВУЗЛІВ**

*Стаття присвячена актуальному питанню технології роботи і технічного оснащення залізничних вузлів із використанням системного підходу. Доведено, що у вузлах накопичилася значна кількість проблем, які негативно впливають на техніко-економічні показники їх функціонування. З'ясовано, що для виявлення «вузьких» місць в роботі конкретного залізничного вузла необхідно виконати ретельне дослідження інфраструктури, технічних засобів, технології всіх складових вузла. Адже особливостями структури і функціонування залізничних вузлів є взаємозв'язок його елементів і технології. Компонівка елементів – «технічна структура» має суттєвий вплив на технологію. Технологічний процес – «технологічна структура» визначає функціональне призначення елементів і зворотнім зв'язком висуває відповідні вимоги до її технічної структури. Визначено, що велике значення в такому дослідженні відводиться виявленню наявних резервів технічного, технологічного і організаційного характеру для розробки на їх підставі проєктних заходів щодо покращення техніко-економічних показників функціонування залізничних вузлів. Висвітлено, що підґрунтям для розробки проєктів розвитку залізничних вузлів є повна і достовірна інформація технічного, технологічного і організаційного характеру в якісному і кількісному вимірах. Вихідною базою для отримання такого роду комплексної інформації можуть слугувати дані системного аналізу, який передбачає розгляд всіх елементів залізничного вузла у їх взаємодії і з оточуючим середовищем. Викладено методіку кількісної оцінки структурних особливостей залізничних вузлів для прийняття проєктного рішення щодо їх розвитку. В результаті системного аналізу виявляються «вузькі» місця і причини їх виникнення, що є підставою для розроблення заходів щодо удосконалення технології і технічного оснащення. Дані системного аналізу залізничного вузла є основним вихідним матеріалом для розроблення проєктної системи розвитку залізничного вузла. З'ясовано, що проєктну систему розробляють в декілька етапів. А саме, на першому етапі оптимізуються технологічні параметри при діючих технічних засобах або незначному їх розвитку. На другому – визначають необхідність посилення елементів технічного оснащення в комплексі з удосконаленням технології. На третьому – виконуються роботи посилення технічних засобів елементів вузла до рівня, який забезпечує пропуск і переробку перспективних поїздо- та вагонопотоків з проєктними техніко-економічними показниками.*

*Науково-практичне значення проведеного дослідження полягає в тому, що на основі системних принципів побудови залізничних вузлів розроблена прийнятна для дослідників, проєктувальників, експертних органів методика кількісної і якісної оцінки структурних особливостей конкретних транспортних об'єктів, зокрема таких як залізничні вузли, яка дозволить аналізувати якісні властивості техніко-технологічної структури для подальшого прийняття обґрунтованого управлінського рішення щодо розвитку структури та технології вузла або залізничної станції.*

**Ключові слова:** транспортна система, транспортний вузол, залізничний вузол, системний аналіз, транспортна інфраструктура, транспортний процес, технологія, проєкт, дослідження операцій.

**Постановка проблеми.** Для стабілізації і зростання економіки держави, покращення умов і підвищення рівня життя населення, необхідно намагатися стійкого і ефективного функціонування транспорту як невід'ємної складової загальнодержавного господарського комплексу. Залізничні вузли як важливі елементи транспортної системи своїм функціонуванням, в значній мірі, впливають на цілу низку важливих техніко-економічних показників.

Предметом дослідження є ЗВ, як окремі комплекси транспортної системи, в яких здійснюється взаємодія різних видів транспорту. В транспортних комплексах, які являють собою складну систему, можна виділити множину інших систем більш низького порядку, адекватних як меті так і характеру проведеного дослідження.

В Україні значимих ЗВ – 14, серед них найважливішими є Харків, Київ, Дніпро, Львів, Одеса. У ЗВ сполучаються технічні засоби і технології магістральних видів транспорту, які сумісно з промисловим забезпечують перерозподіл транзитних і місцевих вантажних і пасажирських потоків. У ЗВ досить часто має місце: невідповідність інфраструктури (в кількісному і якісному вимірах); організаційно-управлінські та інші недоліки, які негативно впливають на показники роботи пунктів взаємодії транспорту, внаслідок чого виникають непродуктивні простой рухомого складу, нераціонально використовуються матеріальні, фінансові і трудові ресурси.

Суттєві зміни в політичній і економічній сферах відображаються на напрямках вантажних потоків, а відтак і на вагоно- і поїздопотоках. Це призводить до суттєвих змін в обсягах і характеру роботи сортувальних станцій і ЗВ. На даний момент у ЗВ існують технічні і технологічні резерви. Постає актуальне питання підвищення якості роботи ЗВ шляхом вдосконалення технології їх роботи та прискорення переробки вагонів всіх категорій у вузлах на базі наявних інфраструктурних можливостей. Становиться важливим завдання визначення таких резервів у ЗВ у всіх елементах їх інфраструктури і в технології роботи, а інструментарієм для цього може слугувати системний аналіз, на основі якого будуть прийматися зважені обґрунтовані управлінські рішення щодо комплексного розвитку (ЗВ), що власне і визначає актуальність даного дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробка наукових методів дослідження процесів функціонування ЗВ, з подальшим доведенням їх до практичного використання, надає можливість

виявляти «вузькі» місця і причини неузгодженості в роботі окремих складових елементів ЗВ; обґрунтовувати найбільш раціональні шляхи вдосконалення цієї роботи за рахунок реконструктивних заходів, технічного переоснащення, покращення системи організації і управління.

Системний підхід у вирішенні проблем функціонування ЗВ, вимагає цілеспрямованого розгляду об'єкту у взаємозв'язку з багатьма факторами і є неодмінною умовою отримання достовірних результатів для прийняття зважених обґрунтованих рішень щодо розвитку об'єкту дослідження.

Вагомий внесок у розвиток ЗВ і станцій внесли відомі вчені Архангельський С.В., Бобровський В.І., Бутько Т.В., Єфименко Ю.І., Козаченко Д.М., Мироненко В.К., Муха Ю.О., Нагорний Є.В., Ющенко М.Р. та ін. Значний внесок у теорію моделювання станцій та ЗВ внесли Мірошніченко В.М., Жуковицький І.В., Мацюк В.І. Дослідженням ЗВ займалися такі науковці: Нагорний Є.В., Літвінова Я.В., Алексеев І.В., Мурадьян А.О., Окороков А.М., Ломотько Д.В., Новіков П.А., Левковець П.Р., Нікітін П.В., Лабута А.В., Карієва Я.К., Камалова Е.А. та інші. Запровадженням сучасних механізмів логістики та мультимодальних перевезень досліджено в працях вітчизняних авторів: Альошинського Є.С., Брайковської А.М., Клюквіної М.С.

Великі залізничні вузли є дуже складними технічними та технологічними системами. Враховуючи складність процесів усередині розвинених вузлів, виникає потреба у більш глибокому вивченні причинно-наслідкових зв'язків технологічних процесів із застосуванням системного підходу [1]. Залізничні вузли є самостійними та неформальними (фізичними) системами, але водночас є підсистемами міжнародної та національної мережі залізниць та транспортних вузлів України [1, 2].

Оцінка техніко-технологічних показників залізничних вузлів є досить складним завданням і зазвичай здійснюється за допомогою аналітичних, графічних та імітаційних моделей. Так, у статті [3, с. 22] на прикладі потужного залізничного вузла викладена структура імітаційної моделі функціонування залізничного вузла на основі агентного моделювання із застосуванням сучасних логістичних підходів. Результатом моделювання є отримання ряду відповідних технологій роботи залізничного вузла при різних параметрах його роботи..

Для реалізації на практиці заходів щодо покращення техніко-економічних показників роботи

станцій та ЗВ вони повинні бути встановлені і розраховані в той чи інший спосіб, а передувати даному процесу повинно системне дослідження технології та їх оснащення. Результати досліджень [1, с. 692] вказують на наявність значного резерву у покращенні експлуатаційної роботи залізничних вузлів.

Велике значення у дослідженні функціонування залізничних вузлів має відводитися виявленню наявних резервів технічного, технологічного і організаційного характеру для розробки на їх підставі проєктних заходів щодо покращення техніко-економічних показників.

Як зазначає автор статті [6], транспортні вузли, що розташовані у місцях взаємодії декількох видів транспорту, є одним з найважливіших елементів транспортної системи країни. Від чіткої та узгодженої роботи транспортних вузлів, правильної взаємодії елементів складного комплексу транспортних пристроїв залежить робота транспортної системи в цілому, а також якість обслуговування всіх споживачів транспортних послуг.

Для вирішення складних транспортних завдань застосовуються комплексні інтелектуальні транспортні системи. Такі комплекси використовують інноваційні розробки в регулюванні транспортних потоків та моделюванні транспортних систем, а також розроблені спеціально для розв'язання транспортних завдань. Комплексні інтелектуальні транспортні системи застосовуються для передачі, збору, обробки відомостей про стан і роботу транспортних засобів, а також для обміну інформацією між керуючими структурами та користувачами в режимі реального часу [7].

В роботі [8] проведено дослідження шляхів збільшення переробної спроможності сортувальної гірки за рахунок перерозподілу маневрової роботи між гірковою і вихідною горловинами сортувального парку. Отримано залежності, що дозволяють визначити момент перенесення маневрової роботи в іншій маневровий район сортувального парку, а також обсяги переробки вагонів, при яких необхідно збільшувати технічне оснащення станції. Для оцінки продуктивності технічного оснащення і технології роботи станції з переробки вагонопотоку доцільно використовувати показник «переробна спроможність сортувального комплексу». В якості технічної переробної спроможності сортувального комплексу пропонується розуміти максимальну кількість вагонів, що може бути ним перероблена протягом доби, при збільшенні якої необхідні заходи з нарощування переробної спроможності.

У статті [9] автори зазначають, що найбільш ефективним способом розрахунку конструктивних параметрів залізничних станцій є застосування процедур автоматизованого проєктування, ефективними способами розрахунку технологічних параметрів і оцінки проєктних рішень є використання методів імітаційного моделювання, в результаті чого можливе удосконалення процедури формування раціональних конструкцій колійного розвитку залізничних станцій та їх техніко-технологічної оцінки, які на відміну від існуючих, базуються на визначенні витрат залізничної станції з наростаючим підсумком за розрахунковим періодом або життєвим циклом проєкту.

У науковій роботі [10] на підставі принципів системного аналізу стосовно до залізничного транспорту виконувався розв'язок транспортних задач, задач з підвищення надійності залізничного транспорту, в результаті чого була розроблена математична модель розповсюдження залежних відмов по системі. В результаті чого було удосконалено методику для вибору раціональної системи утримання локомотивів, в основу якої покладена мінімізація витрат коштів, часу та екологічних ресурсів при збереженні заданого рівня надійності.

У своїй роботі [11] автор на основі аналізу методів формалізації і графічного представлення технологічних процесів залізничних станцій розробив науковий підхід, що дозволяє здійснювати передпроєктне обстеження станції. Сформовано спосіб побудови математичної моделі технологічного процесу станції, досліджено взаємозв'язки параметрів вагонопотоку та технології її роботи, розроблено метод, що дозволяє визначати рівень технічного забезпечення станції. При цьому враховується нерівномірність вхідного потоку. В цій роботі автор зазначає, що імітаційні моделі дають змогу досить детально імітувати технологічні процеси, однак для їх застосування потрібен окремий персонал і певний період часу для виконання розрахунків. Для вирішення цієї проблеми пропонується застосовувати різні моделі на етапах параметризації моделі та імітаційного моделювання. Виходячи з цього, вхідна модель розглядається як основа для формування ефективного інтерфейсу для введення операцій технологічних процесів і їх аналізу.

**Мета статті** полягає в тому, що на основі системних принципів побудови залізничних вузлів розробити таку прийнятну для дослідників, проєктувальників, експертних органів методику кількісної і якісної оцінки структурних особливостей конкретних транспортних об'єктів, зокрема таких

як залізничні вузли, яка дозволить аналізувати якісні властивості техніко-технологічної структури для подальшого прийняття обґрунтованого управлінського рішення щодо розвитку структури та технології вузла або залізничної станції.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

Однією з головних умов ефективного функціонування економічної системи будь-якої країни є створення в інтересах населення і товаровиробників належним чином налагодженого механізму доставки вантажів з місць їх виробництва до пунктів споживання. Ця умова є пріоритетною не тільки для розвитку крупного бізнесу—крупних товаровиробників, але і розвитку середнього і малого бізнесу, на базі яких досягається розвиток економіки і зростання валового продукту.

Потреба в прискоренні обороту товарів і грошової маси визначається економічними критеріями розвинених економічних систем. Такими критеріями повинна визначатися і необхідність розвитку інфраструктури транспортної галузі взагалі і такого важливого її елемента як ЗВ.

Особливостями структури і функціонування ЗВ є тісний взаємозв'язок технічних елементів і технології обробки транзитних потоків і внутрішньовузлової роботи. Компонівка елементів—«технічна структура» має суттєвий вплив на технологію. Технологічний процес—«технологічна структура» визначає функціональне призначення окремих елементів і зворотнім зв'язком висуває відповідні вимоги до її технічної структури. Функціонування (працездатність) ЗВ або його елементів безпосередньо пов'язана з його пропускною і переробною здатністю (Y) і залежить від кількісної і якісної характеристик технічних засобів (M) і від якості побудови і експлуатації ЗВ (структура і зв'язки—C),

$$Y = F(M, C); M = f(m_i), i = 1, n \quad (1)$$

$$C = q(c_j), j = 1, k, \quad (2)$$

де n – кількість врахованих, при визначенні Y технічних елементів  $m_i$ ;

k – теж, структурних елементів  $c_j$ .

В даному випадку *працездатність* – це поточний (або на розрахунковий період) рівень продуктивності об'єкту за існуючих умов експлуатації та завантаження. За однакою технічним оснащенням, але з різними схемами побудови і експлуатації ЗВ мають різну працездатність. Якісні показники роботи залежать також від ступеня завантаження порівнюваних об'єктів (при незначному завантаженні недоліки схем ЗВ проявляються в меншій мірі).

Працездатність визначається кількісними і якісними параметрами. При одному й тому ж рівні завантаження об'єкту рівень досягнутої працездатності, може бути різний (в якості прикладу: за звітний період перероблено Q тон вантажу, при цьому загальний час знаходження вагону в системі— $t_c$ , під обробкою і в її очікуванні— $t_{об}$ , і за цей же період отримані техніко-економічні показники  $t_{ек}$ . За такий же період але в інший час при однаковому рівні завантаження показники  $t_c$ ,  $t_{об}$ ,  $t_{ек}$  вже будуть іншими. Виникає необхідність здійснити відповідні дослідження щодо встановлення причин які призводять до різних показників в аналогічній ситуації).

Слід зазначити, що матеріали звітів офіційної статистики в деяких випадках не забезпечують необхідну повноту і достовірність з огляду на запити дослідника. Статистичні звіти призначені задовільнити в, першу чергу, потреби експлуатаційників і тому вони в повній мірі не можуть задовільнити дослідника і проєктувальника. Тому у відповідності з напрямом і планом дослідження об'єкту необхідно проводити додаткові обстеження на місцях, які можуть здійснюватися з використанням викладених пропозицій.

Техніко-технологічна структура ЗВ може бути представлена у вигляді двох взаємодіючих множин з обмеженою кількістю елементів:

$$X = (x_1, x_2 \dots x_n), \quad (3)$$

де X – множина технічних елементів;

$(x_1, x_2 \dots x_n)$  – колії, сортувальні гірки, внутрішньовузлові ходи та ін.

$$Y = (y_1, y_2 \dots y_n), \quad (4)$$

де Y – множина технологічних ланцюгів обслуговування транспортних потоків і транспортних одиниць, інформаційних потоків;

$(y_1, y_2 \dots y_n)$  – процеси прийому і відправлення поїздів і передач, обробки вагонів в складах транзитних поїздів з переробкою і місцевих вагонів, які прямують на вантажні станції, під'їзні колії, локомотиви «резервом», оброблення масиву інформації та інші ланцюги технологічного процесу.

Суттєвою синергетичною властивістю ЗВ є структурна зв'язність елементів при встановленій технології. Зв'язність здійснюється шляхом взаємодії транспортних та інформаційних потоків з комплексом технічних пристроїв. При послабленні або зникненні того чи іншого зв'язку між окремими елементами відбудеться зміна функціонального призначення системи, або навіть її зникнення.

Головна сутність викладеного підходу полягає в тому, що на основі системних принципів

побудови ЗВ розробити таку прийнятну для дослідників і проектувальників методику оцінки ЗВ, яка дозволить аналізувати якісні властивості техніко-технологічної структури для прийняття обґрунтованого рішення розвитку структури і технології ЗВ.

Вантажна робота в ЗВ розпорошувалася і виконувалася за застарілими технологіями. Проблеми в ЗВ накопичувалися, переробка вагонів здійснювалася зі значними простоями. За таких умов втрачається головний загальносистемний ресурс—час. Якщо ситуація в ЗВ не почне виправлятися, то ця проблема буде не менш актуальною ніж питання розвитку мережі в цілому або окремих значимих її напрямків.

Функціонування ЗВ з високими техніко-економічними показниками передбачає вирішення двох важливих задач: перша – вдосконалення інфраструктури і технічних засобів і на їх основі технологічних процесів; друга – встановлення раціональних співвідношень і приведення технічного оснащення і технології елементів ЗВ у відповідність з обсягами роботи.

Названі задачі повинні вирішуватися у взаємозв'язку. При розробленні раціональних режимів функціонування ЗВ необхідно враховувати діяльність всіх його складових, тому що уповільнення або прискорення руху вагонопотоків в будь-якому елементі ЗВ неминуче позначиться на функціонуванні інших. Обов'язковою умовою є врахування питань взаємодії роботи станцій між собою, з прилеглими перегонами і під'їзними коліями. Паралельно з вирішенням задач покращення технічних засобів розробляється питання раціонального складу бригад в парках станцій, резерву поїзних локомотивів, оснащення вантажних фронтів.

Для покращення показників функціонування ЗВ можуть бути використані різноманітні методи. Ефективними вважаються методи дослідження операцій при вивченні окремих аспектів зазначених проблем, які виникають при розгляді ЗВ. Щодо визначення кількісної і якісної характеристик елементів ЗВ і можливих резервів пропускну і переробної спроможностей, оптимізації параметрів технологічних процесів елементів вузла необхідно мати повну і, що дуже важливо, достовірну інформацію, яка характеризує ступінь використання потужностей інфраструктури і технічних засобів. Вихідною базою для отримання комплексної і достовірної інформації можуть слугувати дані, які отримані з використанням системного аналізу.

Основні етапи системного аналізу роботи ЗВ можуть бути зведені до наступного: опис системи за всіма її складовими (технічні техноло-

гічні, інформаційні, спосіб організації переробки вагонопотоків і розподілу роботи між станціями та її економічна оцінка та ін.). Якщо ЗВ входить до складу транспортного вузла, тоді необхідно навести характеристики взаємодіючих видів транспорту та транспортних об'єднань.

При здійсненні відбору техніко-економічних показників необхідно враховувати ту обставину, що значення багатьох величин, які характеризують кількісну і якісну сторони роботи ЗВ, мають стохастичний характер і залежать від багатьох факторів, хоча в регламентуючих документах вони вказані як детерміновані. Тому всі величини повинні бути визначені, закономірності їх встановлені і чітко сформульовані.

#### **Основні етапи розробки проектної системи ЗВ.**

Дані системного аналізу роботи ЗВ є основним вихідним матеріалом для розроблення проектної системи ЗВ яка виконується поетапно в наступній послідовності: визначення проблеми, яка потребує вирішення, як на існуючі, так і на перспективні обсяги роботи; дати оцінку реальності визначених проблем і можливих шляхів їх вирішення; подати рекомендації щодо дослідження проблем і основним шляхам їх вирішення.

При реалізації проектних рекомендацій необхідно враховувати обставини, які пов'язані з суб'єктивними факторами, зокрема з такими як «обережністю» (мінімізація ризику). Виявлені фактори можуть проявлятися у випадках, коли оптимальний варіант, який пропонується для ЗВ або його елементів є новим. В таких випадках фактор «обережності» може призвести до повного несприйняття запропонованого варіанту. Другою проблемою, яка схожа з проблемою «обережності» є ситуація, яка пов'язана з наявністю груп осіб, які мають різні інтереси, кожна з яких підтримує і відстоює варіанти рішення які є для них найбільш «прийнятні».

Такі проблеми можуть виникати при вдосконаленні єдиного технологічного процесу роботи станції і під'їзних колій та на стиках різних видів транспорту. Таким чином, перед тим як приступити до завершення розробки і реалізації обґрунтованих рекомендацій, необхідно затвердити їх у замовника або в уповноваженої інстанції більш високого порядку.

Проектну систему розробляють в декілька етапів. На першому етапі оптимізуються параметри технологічних процесів елементів при діючих технічних засобах або незначному їх розвитку, який може здійснюватися власними ресурсами того чи іншого елемента вузла.



В першу чергу розробляються заходи підсилення технічних засобів, які не потребують капітальних витрат, але які дозволяють усунути в ЗВ диспропорції, які негативно впливають на техніко-економічні показники. На другому етапі визначається необхідність посилення елементів технічного оснащення в комплексі з удосконаленням технології. На третьому етапі виконуються роботи посилення технічних засобів елементів вузла до рівня, який забезпечує пропуск і переробку перспективних поїздо- та вагонопотоків з проєктними техніко-економічними показниками. Паралельно вирішуються питання оптимізації параметрів технологічних процесів, вибору оптимального складу бригад в парках станцій, розробляються і обґрунтовуються питання взаємодії в роботі всіх елементів вузла.

Оптимізацією параметрів технології роботи, вибором і обґрунтуванням необхідних варіантів посилення потужностей технічних засобів до рівня, який забезпечує в оптимальному режимі пропуск і переробку існуючих і перспективних поїздо- і вагонопотоків і встановленням послідовності виконання реконструктивних робіт у вузлі завершується розробка системи.

Для комплексного вирішення задач ЗВ паралельно з роботами вдосконалення технології і технічних засобів магістрального залізничного транспорту повинна виконуватися аналогічна робота на промисловому, та інших видах транспорту з детальною проробкою питань їх взаємодії.

Дана методика виконання системного аналізу вдосконалення технології роботи і технічного оснащення ЗВ може бути рекомендована для

використання проєктними організаціями, експертними органами та експлуатаційниками задля покращення техніко-економічних показників ЗВ.

**Висновки.** Залізничні вузли є важливими елементами транспортної системи від функціонування яких в значній мірі залежать соціально-економічні показники суспільства. Історичні передумови становлення ЗВ та соціально-економічні зміни призвели до накопичення низки проблем, що негативно позначається на їх техніко-економічних показниках і гальмує соціально-економічні процеси. Виходячи з того, що залізничні вузли являють собою складні системи, – вирішення проблем яких повинно здійснюватися комплексно з врахуванням всіх складових технічного і технологічного, організаційного характеру.

Для вирішення питання вдосконалення технології роботи і можливих варіантів розвитку технічних засобів елементів ЗВ необхідно проаналізувати весь комплекс проблем у взаємному зв'язку інфраструктури, технічних засобів елементів ЗВ та технологію їх роботи.

Велике значення для якісного розроблення проєктів розвитку ЗВ є наявність повної і достовірної інформації технічного, технологічного і організаційного характеру. Вихідною базою для отримання такого роду комплексної інформації можуть слугувати дані системного аналізу.

Системний аналіз дозволяє більш обґрунтовано і ефективно ставити та вирішувати численні завдання у сфері побудови, функціонування, розвитку залізничних вузлів як важливих складових транспортних систем.

#### Список літератури:

- 1 Петрушов В.В., Піддубчак В.М., Замула І.В., Черніков В.С., Залізничний вузол як складна технологічна система. «Молодий вчений» Технічні науки № 11 (75) листопад, 2019 р. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-11-75-146>
- 2 Viacheslav Matsiuk, Viktor Myronenko. Optimization of the local traffic volume processing in railway junctions. 7-th European conference of young research and scientific workers. University of Zilina, Slovak Republic. Zilina, 2007. С. 153–156.
- 3 Запара В. М., Запара Я. В., Гергель І. Г. Удосконалення технології роботи залізничного вузла шляхом застосування сучасних логістичних підходів. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2015. Вип. 156. С. 62-68. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt\\_2015\\_156\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2015_156_11)
- 4 Бобровський В.І. Теоретичні основи удосконалення конструкцій та технології роботи залізничних станцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.22.20 Експлуатація та ремонт засобів транспорту. Дніпро, 2002. 33 с.
- 5 Волканова Н.Д. Удосконалення діяльністю транспортного вузла : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора економ. наук : спец. 08.00.03 Економіка та управління національним господарством. Харків, 2007. 23 с.
- 6 Нагорний Є. В., Огороков А. М., Переста Г. І. Дослідження розвитку системи транспортного обслуговування вантажовласників у транспортних вузлах. 2011. Режим доступу до ресурсу: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/1495/1/Nagorny.pdf>
- 7 Гайков А. Р., Євсєєва О. В., Баранов В. Ю. Інтелектуальні транспортні системи в Україні. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Х.: НТУ «ХПІ», 2014. № 9 (1052). С. 106-112. Режим доступу: <http://www.kpi.kharkov.ua/archive/86.pdf>

8 Торопов Б. І. Розвиток наукових уявлень щодо розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д. ДНУЗТ. 2005. Вип. 9. С. 109–114.

9 Огар О. М., Берестов І. В., Бантюков С. Є., Круглова Н. С.. Напрями удосконалення методів розформування конструкцій колійного розвитку залізничних станцій та їх техніко-технологічної оцінки. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. Вип. 21. 2021. С. 60 – 67. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2021/237664>. Режим доступу до ресурсу: <http://tstt.diit.edu.ua/article/view/237664>.

10 Гришечкіна Т. С. Удосконалення системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту з урахуванням залежних відмов їх елементів: дис. на здобуття наук. наукового ступеня кандидата техн. наук: спец. 05.22.20 – Експлуатація і ремонт засобів транспорту. Галузь знань 27 – Транспорт. Дніпро, 2021. 164 с.

11 Горбова О. В. Удосконалення методів техніко-експлуатаційної оцінки роботи залізничних станцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. – Дніпро, 2016. – 24 с.

**Toropov B.I., Strelko O.H., Hrushevska T.M., Vasilova H.S., Ligon Yu.Yu.**

### **APPLICATION OF SYSTEM ANALYSIS FOR IMPROVING TECHNOLOGY AND TECHNICAL EQUIPMENT OF RAILWAY NODES**

*The article is devoted to the topical issue of railway nodes operation and technical equipment using a system approach. It has been proven that the nodes have accumulated a significant number of problems that negatively affect the technical and economic indicators of their functioning. It was found that in order to identify the limiting elements in the operation of a particular railway node, it is necessary to carry out a thorough study of the infrastructure, technical means, and technology of all components of the node. After all, the peculiarities of the structure and functioning of railway nodes are the interconnection of its elements and technology. The arrangement of elements – the "technical structure" has a significant impact on the technology. Technological process – "technological structure" determines the functional purpose of the elements and, in feedback, sets the corresponding requirements for its technical structure. It was determined that of great importance in such a study is to identify available technical, technological and organizational reserves for the development of project measures to improve the technical and economic indicators of the railway nodes functioning. It is highlighted that the basis for the development of railway nodes projects is complete and reliable information of a technical, technological and organizational nature in qualitative and quantitative dimensions. The initial basis for obtaining this kind of complex information can be the data of a system analysis, which involves the consideration of all elements of the railway nodes in their interaction with the surrounding environment. The method of quantitative assessment of the structural features of railway nodes for making a project decision regarding their development is outlined. As a result of the system analysis, "bottlenecks" and their causes will be revealed, which is the basis for developing measures to improve technology and technical equipment. The data of the system analysis of the railway nodes is the main source material for the development. It was found that the project system is being developed in several stages. Namely, at the first stage, technological parameters are optimized with existing technical means or their minor development. The second step is to determine the need to strengthen the elements of technical equipment in combination with the improvement of technology. On the third stage, work is being carried out to strengthen the technical means of the elements of the node to the level that ensures the passage and processing of promising train and wagon flows with project technical and economic indicators.*

*The scientific and practical significance of the article is that, on the basis of the system principles of the railway nodes construction, a method of quantitative and qualitative assessment of specific transport objects structural features, has been developed, acceptable for researchers, designers, expert bodies, which will allow analyzing the qualitative properties of the technical and technological structure for the further adoption of a reasoned management decision regarding the development of the structure and technology of a node or railway station.*

**Key words:** transport system, transport node, railway node, system analysis, transport infrastructure, transport process, technology, project, operations research.

**Трюхан О.М.**

Національний авіаційний університет

## ПОЛЬОТИ В УМОВАХ АТМОСФЕРНОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

У статті досліджуються фізичне підґрунтя польоту літаків в умовах особливого стану атмосфери, який характеризується неупорядкованим, хаотичним рухом – так званою турбулентністю. Розглядаються особливості руху повітря в купових хмарах та грозової діяльності.

При польоті в неспокійній атмосфері можуть відчуватись різкі та сильні удари по корпусу літака, з'являється бовтанка. Бовтанка може призвести до передчасного виходу з ладу окремих вузлів і елементів конструкції літака, до відмови бортового обладнання, збільшується «відхід» (неточність) гіроскопічних приладів, погіршуються точнісні характеристики систем. Відзначаються нестійкі показання окремих приладів. Реакція літака на порив повітря зокрема залежить від спів розмірності збурених зон повітря і розмірів літака, взаємної орієнтації у просторі вектора швидкості літака та напряму руху повітряної маси, співвідношення швидкостей літака та повітряної маси, аеродинамічних характеристик літака, його маси і т.д.

На деяких літаках на великих приладових швидкостях відбувається зтяжеління управління. Великі зусилля на штурвалі та необхідність постійного контролю положення літака викликають підвищену стомлюваність екіпажу. При польотах у бовтанку зменшується діапазон наявних швидкостей і висот. На малих швидкостях виникає небезпека виходу на кути атаки звалювання, а на великих – перевищення максимального експлуатаційного перевантаження.

Показані аналітична величина швидкості пориву, за якого літак виходить на кути звалювання, її залежність від несучих властивостей літака та похідної коефіцієнта підйомної сили літака по куту атаки. Наведено вплив вертикального пориву на допустиму швидкість горизонтального польоту.

**Ключові слова:** атмосферна турбулентність, осі вихорів, зміни у часі і просторі, висхідні та низхідні потоки, бовтанка, динамічний та термічний характер, кути атаки, перевантаження, звалювання, емоційне навантаження, умовний порив.

**Постановка проблеми.** Особливістю стану атмосфери є неупорядкований, хаотичний, вихоровий, так званий турбулентний характер руху повітря. Структура турбулентних рухів досить складна, оскільки осі вихорів орієнтовані в різних напрямках і швидко змінюють своє положення в просторі. Напрямок і швидкість перебігу повітря в турбулентних зонах зазнають різких і швидких змін у часі та просторі. Виникаючи при цьому збурення атмосфери можуть бути різних розмірів, від декількох міліметрів до десятків і сотень кілометрів.

Особливо інтенсивний рух повітря спостерігається в купових хмарах та в районі грозової діяльності. У грозовій хмарі зустрічаються найбільш сильні висхідні та низхідні потоки зі швидкостями до 25 м/с і більше. При польоті в неспокійній атмосфері можуть відчуватись різкі та сильні удари повітряних мас по корпусу літака. Літак ніби здригається, але його становище у просторі змінюється мало. Однак при дії сильних поривів можливі значні зміни положення літака та швидкості його польоту. При цьому змінюються кути атаки та ковзання, а відповідно і перевантаження –

нормальні ( $n_y$ ) та бокові ( $n_z$ ), які саме і є причиною бовтанки літака.

Бовтанка не тільки істотно ускладнює керування літаком, але може стати причиною виходу його на неприпустимо великі перевантаження або кути атаки, що супроводжуються руйнуванням конструкції або звалюванням. Бовтанка може призвести до передчасного виходу з ладу окремих вузлів і елементів конструкції літака, до відмови бортового обладнання, збільшується «відхід» (неточність) гіроскопічних приладів, погіршуються точнісні характеристики систем. Відзначаються нестійкі показання окремих приладів. При бовтанці екіпаж відчуває труднощі у витримуванні режиму польоту, виконанні навігаційних вимірювань, зростає емоційне навантаження тощо.

У контексті викладеного питання досліджень поведінки літака в атмосферній турбулентності та відпрацювання заходів запобігання катастрофічних наслідків на сьогоднішній день залишаються проблемними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями поведінки літака при попаданні в турбулентні шари атмосфери займаються стільки скільки

існує авіація. Окремі особливості виконання польотів в умовах значних турбулентних повітряних рухів розглянуто у роботах [3–7, 9–12, 15–19].

В програмах підготовки пілотів літаків, у тому числі і комерційної авіації, звертається увага на особливості пілотування в умовах турбулентності, зсувів вітру [2, с. 912]. При попаданні в зону активної грозової діяльності та турбулентності екіпаж повинен застосувати усі можливості щодо виходу із цієї ситуації включно із зміною маршруту та своєчасним оповіщенням органів повітряного руху стосовно обставин, які склалися [1, с. 12].

За прогнозами кліматологів та метеорологів до 2050–2080 років у зв'язку зі змінами клімату попадання літаків в умови турбулентності під час польотів стане втричі частішим явищем [14, с. 1], тому питання безпеки за великих швидкісних атмосферних градієнтів залишаються актуальними та потребують подальших досліджень для підвищення ефективності заходів щодо безпеки польотів.

**Метою статті** є викладення фізичної сутності окремих процесів, які мають місце при обтіканні літака турбулентним повітряним потоком з подальшою можливістю відпрацювання заходів, спрямованих на зменшення ймовірності виникнення катастрофічних ситуацій.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Залежно від впливу турбулентності на літак розрізняють: слабку бовтанку, коли літак злегка здригається ( $\Delta n_y$  не більше  $\pm 0,5$ ); помірну бовтанку, коли літак зазнає частих поштовхів і похитування зі зміною висоти польоту, але суттєві ускладнення пілотування відсутні ( $\Delta n_y$  до 1); сильну бовтанку, коли літак різко здригається і відчуються окремі кидки за різними напрямками, що порушує встановлений режим польоту, при цьому різко змінюються крен, курс, висота польоту, ускладнюється використання автопілоту, пілотажно-навігаційних приладів та ін. ( $\Delta n_y > 1$ ) [10, с. 125].

Для оцінки ймовірності потрапляння літака в потужні пориви повітря необхідно проводити більш досконало збір статистичних даних про турбулентність атмосфери. При обробці даних порив повітря приводить до значення умовного пориву, що має заданий градієнт наростання швидкості і викликає таке ж навантаження, яке викликав дійсний порив. Швидкість такого умовного пориву слід приймати за ефективний. Під поривом розуміють таке переміщення повітряних мас, при якому швидкість руху повітря (стосовно літака) зростає до максимального значення за час менший двох секунд.

При виконанні зльотів та посадок слід пам'ятати, що літаючи на малих висотах, літак значно частіше піддається впливу бовтанки або окремих поривів. Так, наприклад, повторюваність навантажень і перевантажень при польотах на висотах 100–500 м може бути в 5–10 разів більше в порівнянні з середніми висотами. Тому ресурс планера, особливо неманеврених літаків, для польотів на малих висотах значно менше, ніж для польотів на середніх і великих висотах [18, с. 45].

Реакція літака на порив повітря залежить від наступних факторів:

спів розмірності збурених зон повітря і розмірів літака; взаємної орієнтації у просторі вектора швидкості літака та напрямку руху повітряної маси;

співвідношення швидкостей літака та повітряної маси; аеродинамічних характеристик літака, його маси. З погляду безпеки польоту найбільше значення мають вертикальні пориви повітря – висхідні і низхідні.

Висхідний вертикальний порив зі швидкістю  $W_y$  в перший момент викликає збільшення кута атаки літака (рис. 1 наведено нижче). Льотчик практично спостерігає кидок літака вгору. Приріст кута атаки визначається формулою  $\Delta\alpha \approx W_y / V$ , де  $V$  – істинна (повітряна) швидкість.

Найбільш небезпечними наслідками різкого збільшення вихідного кута атаки можуть бути вихід літака на закритичні кути атаки і збільшення фактичного перевантаження вище допустимого. Тому перед вильотом льотчик повинен ознайомитися з інформацією про можливість попадання в сильну бовтанку. У польоті екіпаж повинен вести візуальні спостереження та використовувати бортовий радіолокатор для обходу грозової діяльності. Для подолання зон бовтанки, що є впливом гір, слід літати над гірським хребтом з перевищенням, рівним щонайменше половини висоти хребта.

Відхід із зони струменевих течій з підвищеною турбулентністю поблизу тропопаузи можна здійснити зміною ешелону по висоті на 1–2 км вниз або вгору. В умовах сильної бовтанки головна увага льотчика повинна зосереджуватися на утриманні літака в прямолінійному горизонтальному польоті. Керувати літаком треба, користуючись авіагоризонтом. Не слід допускати великих кренів і прагнути точно витримувати висоту або кут тангажу. Положення важелів управління двигунами доцільно зберігати постійними. Не слід прагнути точно витримувати швидкість, потрібно утримувати її близькою до рекомендованої. При необхідності змінювати тягу плавним переміщенням важелів управління двигунами. Пам'ятати, що через велику інертність

нманевреного літака навіть значна зміна тяги дає повільну зміну швидкості польоту. Дії рулями також мають бути плавними. Париувати збільшення перевантаження льотчик повинен лише за потужних поривів повітря, що характеризуються тривалим наростанням перевантаження одного знаку. Користуватися кермом напряду не рекомендується.

За виникнення великих коливань кута тангажу, льотчику доводиться частіше втручатися в управління літаком для парирування збурень. Рухи рулями відносно великі. При подальшому збільшенні швидкості польоту збільшуються коливання нормального перевантаження. Закидання перевантаження ускладнюють пілотування і викликають необхідність підтягнути прив'язні реміні. Пілотувати літак доводиться обережніше, чітко дозуючи відхилення штурвалу. Великі зусилля на штурвалі та необхідність постійного контролю положення літака викликають підвищену стомлюваність екіпажу.

При польоті з автопілотом в умовах турбулентності не слід забувати про те, що автопілот може «відключитися» і льотчик повинен буде брати керування на себе. Оскільки головним завданням у цих умовах є стабілізація літака в просторі, коректор висоти та пристрої стабілізації швидкості, числа М тощо повинні бути вимкнені. Дослідження показують, що крім полегшення управління літаком використання автопілоту призводить до зниження середнього рівня перевантажень на 10–15%, що діють на літак у неспокійній атмосфері.

Попадання літака в зону струменевих течій призводить до зміни путьової швидкості та кілометрової витрати палива. Довжина струменевих течій може вимірюватися тисячами, ширина – сотнями, товщина – кількома кілометрами. Швидкості струменевих течій досягають 350 км/год. Основні напрями струменевих течій у стратосфері – із заходу на схід.

При польоті в бовтанку зменшується діапазон наявних швидкостей і висот. На малих швидкостях виникає небезпека виходу на кути атаки звалювання  $\alpha_{зв}$ , а на великих – перевищення максимального експлуатаційного перевантаження  $n_{y\max}^e$ .

Для того, щоб літак збільшив кут атаки горизонтального польоту  $\alpha_{г.п.}$  до кута атаки звалювання, необхідний наступний порив повітря (рис. 1):

$$W_{y\text{ звал}} = V\Delta\alpha_{зв} = V(\alpha_{зв} - \alpha_{г.п.})$$

Оскільки (при  $\alpha_0 = 0$ ), то

$$\alpha_{г.п.} = \frac{C_{y\text{ г.п.}}}{C_y^\alpha} = \frac{2G}{C_y^\alpha \rho V^2 S};$$

$$W_{y\text{ звал}} = V\alpha_{зв} = \frac{2G}{C_{y\text{ звал}}^\alpha \rho V^2 S}, \quad (1)$$

де:  $C_{y\text{ г.п.}}$  – коефіцієнт підйомної сили горизонтального польоту;

$C_y^\alpha$  – похідна коефіцієнта підйомної сили літака по куту атаки;

$\rho$  – густина повітря;  $S$  – площа крила літака.

Проаналізуємо отриманий вираз. Чим менше швидкість польоту, тим за меншої величини вертикального пориву літак вийде на кут атаки звалювання. Тому при польоті в турбулентній атмосфері і при ймовірній величині ефективного пориву повітря мінімальна швидкість польоту повинна бути збільшена. Збільшення висоти польоту (зменшення  $\rho$ ) зменшує значення швидкості пориву (1), що призводить до виходу на  $\alpha_{зв}$ . Чим більше подовження крила, що призводить до збільшення  $C_y^\alpha$ , тим легше літак вертикальним поривом виводиться на режим звалювання.

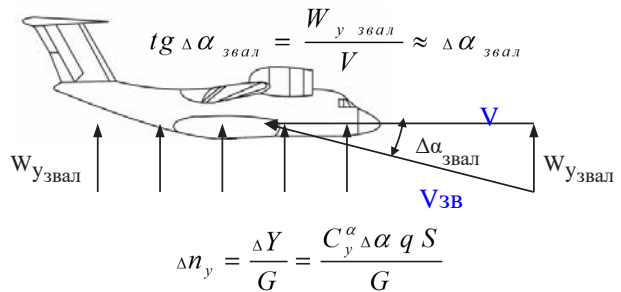


Рис. 1. Вихід літака на кути атаки звалювання за наявності вертикальних поривів

Швидкість польоту не повинна бути достатньо великою, щоб не допустити перевищення перевантаження за міцністю літака, збільшення якого можна визначити за формулою:

$$\Delta n_y = \frac{\Delta Y}{G} = C_y^\alpha \Delta\alpha \frac{\rho V^2}{2G} S = \frac{C_y^\alpha \rho V W_y S}{2G} \quad (2)$$

Як видно, той самий порив на більшій швидкості викликає більшу зміну перевантаження. При заданій швидкості пориву  $W_y$  значення перевантаження залежить від швидкості та висоти польоту, питомого навантаження на крило  $G/S$  та значення коефіцієнта  $C_y^\alpha$ .

Слід зазначити, що вирази (1) та (2) справедливі для випадку, коли швидкість пориву зростає миттєво і потім залишається постійною, обтікання прийнято стаціонарним, а літак сприймається як жорстке тіло. Фактично завжди є проміжок часу, протягом якого швидкість пориву зростає від нульового значення до максимального. За цей час літак отримує вертикальне переміщення і здійснює поворот навколо поперечної осі. Обтікання є фактично нестационарним. З'являються пружні деформації конструкції літака. Тому для зміни перевантаження доцільно враховувати динаміку

навантаження, внаслідок чого формула буде мати наступний вигляд:

$$\Delta n_y = K_d \frac{C_y^\alpha \rho V W_y S}{2G}, \quad (3)$$

де:  $K_d$  – коефіцієнт, що враховує динаміку навантаження;  $\rho$  – густина повітря.

Коефіцієнт  $K_d$  менше одиниці. Перевантаження знижується внаслідок переміщення літака, його повороту навколо поперечної осі  $OZ$ , нестационарності обтікання і т.д.

Аеродинамічні сили, викликані пружними деформаціями конструкції літака, ведуть до зменшення згинаючих моментів як внаслідок скидання навантаження з кінців крила, так і в результаті падіння загального перевантаження через зменшення коефіцієнта  $C_y^\alpha$  при деформації літака. Розвантажуючий вплив деформацій позначається тим більше, чим більша швидкість польоту (швидкісний напір).

З формули (3) слідує, що на цій висоті польоту і за певної  $W_y$  приріст перевантаження тим більше, чим більша швидкість польоту.

Значення перевантаження не повинно перевищувати максимальне експлуатаційне, а приріст перевантаження не повинен перевищувати величину

$$\Delta n_y = n_{y_{\max}}^e - 1. \quad (4)$$

Тому справжня швидкість горизонтального польоту в бовтанку обмежена значенням, що може бути визначено наступною формулою:

$$V = \frac{2G(n_{y_{\max}}^e - 1)}{K C_y^\alpha \rho W_y S}. \quad (5)$$

Чим більше  $W_y$ , тим менша допустима швидкість. При одній і тій же  $W_y$  істинна швидкість, за якої літак виходить на  $n_{y_{\max}}^e$  зі збільшенням висоти польоту зростає.

При польоті в сильну бовтанку рекомендується витримувати швидкість польоту, за якої є запас як за умовою міцності, так і за умов зриву.

На великих висотах поблизу стелі літака політ здійснюється на кутах атаки, близьких до допустимого. Для збільшення запасу по куту атаки слід перейти на зниження, щоб виконувати політ на менших кутах атаки. Поточне і допустиме значення кута атаки контролюються льотчиком за вказівниками кута атаки та перевантаження, якщо вони встановлені на літаку. Доречи, після двох катастроф літаків Boeing-737max8 у 2019 р. піднімається питання щодо повернення вказівника кутів атаки на приладову дошку пілотів.

Таким чином, діапазон висот і швидкостей польоту в умовах бовтанки значно звужується. Найбільш небезпечна бовтанка для літаків, що мають високі несучі властивості крила, коли коефіцієнт  $C_y^\alpha$  досить великий.

Зменшення стріловидності, збільшення подовження крила роблять літак більш чутливим до бовтанки. Запас по куту атаки залежить від польотної маси літака. При зменшенні маси запас по куту атаки збільшується. У той же час, чим більша маса, тим інертніший літак і тим менші перевантаження згідно з формулою (3) будуть створюватися при польоті в неспокійній атмосфері. Однак великій масі відповідає менше припустиме перевантаження. Внаслідок цього політ на більш навантаженому літаку в умовах бовтанки не стає менш небезпечним.

**Висновки.** Наведено фізичну сутність окремих процесів, які мають місце при польоті літака в умовах атмосферної турбулентності. Матеріал доцільно використовувати в якості методичних рекомендацій під час проведення занять з льотним складом при розгляді питань пілотування в особливих умовах польоту.

#### Список літератури:

1. Загальні правила польотів у повітряному просторі України: Наказ Державної авіаційної служби України від 06.02.2017 № 66/73. <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0654-17>
2. Прийнятні методи відповідності (АМС) та інструктивний матеріал (GM), що роз'яснюють положення Авіаційних правил України «Технічні вимоги та адміністративні процедури для льотних екіпажів цивільної авіації»: Наказ Державної авіаційної служби України від 12 березня 2018 року № 220. <https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2020/02/Nakaz-220-AMC-GM.pdf>
3. Воробйов В.В. Проблеми безпеки польотів при маневруванні на малій висоті. Проблеми безпеки польотів. К.: НАОУ. 1991. С. 5-11.
4. Трюхан О.М. Тактика авіації у локальних війнах та збройних конфліктах: досвід, аналіз, тенденції. – К.: НАОУ, 2005.–340 с, 2005.
5. Алексеев В.В. Бездетнов Н.П. Філософія льотної безпеки. – К.: НАОУ. 1998. 336 с.
6. Трюхан О.М., Осьмак В.Є., Докієнко Л.М. Спеціалізовані комерційні польоти з високим ступенем ризику – проблеми та можливі напрями вирішення. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 34 (73) № 2, ч. 2, 2023. С. 215-221. [https://drive.google.com/file/d/1tLRj7zgpFoiQ3PIEIFDbtcN3yvPfo9g5/view?usp=drive\\_web](https://drive.google.com/file/d/1tLRj7zgpFoiQ3PIEIFDbtcN3yvPfo9g5/view?usp=drive_web)

7. Баранов А.М. Хмари та безпека польотів. Гідрометвидав. – К.:1983. 98 с.
8. Трюхан О. М., Селіщев С. В., Паращенко Т. В. Деякі проблеми забезпечення якості надання послуг із застосуванням цивільних безпілотних літальних апаратів в Україні та можливі шляхи їх вирішення. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 1(46). С. 51-57. <https://doi.org/10.30748/nitps>.
9. Ніколаєв Л.Ф. Аеродинаміка та динаміка польоту транспортних літаків. Кіровоград: Льотна академія, 1990. – 392 с.
10. Бехтир П.Т., Бехтир В.П. Практична аеродинаміка літака Іл-76. Харків: ХАІ, 1979. – 154 с.
11. Калачев Г. С. Льотчик та безпека польоту. К.: КПЦА, 1979. 222 с.
12. Котик М. Г., Філіппов В. В. Польоти на граничних режимах. К.: КПЦА, 1977. 239 с.
13. Семенчин В. А., Захаренко В. А., Чмовж В. В. Аеродинаміка та динаміка польоту. Харків : НАУ “ХАІ”, 2003. 381 с.
14. Турбулентність при польотах літаків зростає: вчені назвали причину. URL: <https://dip.org.ua/velika-britaniya/turbulentnist-pry-polotah-litakiv-zrostaе-vcheni-nazvaly-prychynu/>
15. Трюхан О.М. Фактори небезпеки при транспортуванні вертольотом вантажів на зовнішній підвісці. Тези доповіді. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції /Міністерство освіти і науки України, – К.:НАУ, 2022. С. 55-57. URL: <https://meet.google.com/fby-uuix-qng>
16. Соляник П.Н. Експериментальна аеродинаміка. Навчальний посібник / П.Н. Соляник, М.Л. Сургайло, В.В. Чмовж. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харківський авіаційний інститут», 2007. 96 с.
17. Robert F. Stengel. Flight Dynamics: Second Edition. USA. Princeton University Press. November 2022. 921 p.
18. Івус Г.П. Метеорологічне обслуговування полярної авіації та судноплавства: Конспект лекцій. Одеса: Екологія, 2008. 156 с.
19. Турбулентність у літаку: що це та чим небезпечно. Що таке турбулентність та як вона виникає? Що відбувається з літаком під час турбулентності. URL: <https://discovery-way.ru/uk/poland/turbulentnost-v-samolete-chto-eto-i-chem-opasno-chto-takoe.html>

#### **Trukhan O.M. FLIGHTS IN CONDITIONS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE**

*The article examines the physical basis of aircraft flight in the conditions of a special state of the atmosphere, which is characterized by disordered, chaotic movement - the so-called turbulence. Peculiarities of air movement in cumulus clouds and thunderstorm activity are considered.*

*When flying in a turbulent atmosphere, sharp and strong impacts can be felt on the body of the aircraft, a bobble appears. The wobble can lead to the premature failure of individual components and structural elements of the aircraft, to the failure of on-board equipment, the «departure» (inaccuracy) of gyroscopic devices increases, and the accuracy characteristics of the systems deteriorate. Oscillations and twitching of instrument arrows are observed. Unstable readings of individual devices are noted. The reaction of the aircraft to the gust of air in particular depends on the co-dimensionality of the disturbed air zones and the size of the aircraft, the mutual orientation in space of the aircraft speed vector and the direction of movement of the air mass, the ratio of the speeds of the aircraft and the air mass, the aerodynamic characteristics of the aircraft, its mass, etc.*

*On some aircraft, at high instrument speeds, the control is overloaded. Great efforts on the rudder and the need to constantly control the position of the aircraft cause increased fatigue of the crew. When flying in a loop, the range of available speeds and altitudes decreases. At low speeds, there is a danger of going to angles of attack, and at high speeds, there is a danger of exceeding the maximum operational overload. The analytical value of the gust speed at which the aircraft enters the bank angles, its dependence on the bearing properties of the aircraft and the derivative of the lift coefficient of the aircraft at the angle of attack are shown. The effect of vertical gust on the permissible speed of horizontal flight is given.*

**Key words:** *atmospheric turbulence, axes of vortices, changes in time and space, updrafts and downdrafts, swirl, dynamic and thermal character, angles of attack, overload, overturning, emotional load, conditional rush.*

## БУДІВНИЦТВО

УДК 614.841.332

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/28>

*Кайдаш М.Д.*

Національний університет «Чернігівська політехніка»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СКЛАДНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ У КОНТЕКСТІ АНАЛІЗУ Й СИНТЕЗУ РІЗНИХ ТИПІВ МЕХАНІЗМІВ

*У статті розглянуто проблематику дослідження властивостей складних механічних систем у контексті аналізу й синтезу різних типів механізмів. Наголошено на актуальності цієї проблематики, оскільки механічні системи широко використовують у різних сферах техніки та виробництва, тому оптимізація їхніх експлуатаційних параметрів є важливим завданням. Дослідження параметрів функціонування механічних систем є предметом багатьох наукових праць, проте немає досліджень про оптимальні засоби синтезу складних механізмів і систем. За результатами розгляду предметної сфери визначено номенклатуру програмних засобів, що дають змогу виконувати синтез і параметричний аналіз складних механічних систем, серед яких – MechAnalyzer Software, GIM Software, MechDesigner Software, Mechanism Generator SolidWorks і Mechanism Developer (MechDev).*

*Під час перехресного аналізу визначено, що найбільш оптимальним програмним засобом для дослідження властивостей складних механічних систем у контексті аналізу й синтезу різних типів механізмів є Mechanism Generator SolidWorks. Використання оптимального програмного засобу для дослідження властивостей складних механічних систем є важливим завданням у сучасній механічній інженерії. Практична значимість полягає в можливості застосування оптимального програмного засобу для розроблення і вдосконалення механічних систем у різних галузях промисловості. Використання відповідного програмного забезпечення може допомогти підвищити якість і продуктивність розроблюваних механічних систем, зменшити час і витрати на дослідження та проектування. Отже, визначення оптимального програмного засобу для дослідження властивостей складних механічних систем має важливу наукову та практичну значимість, що можна використати для подальшого розвитку механічної інженерії.*

**Ключові слова:** механічні системи, синтез, аналіз, GIM Software, Mechanism Generator SolidWorks.

**Постановка проблеми.** Дослідження властивостей складних механічних систем у контексті аналізу й синтезу різних типів механізмів є однією із ключових проблем у галузі механіки. З одного боку, є потреба в розумінні поведінки складних механічних систем для покращення їхньої ефективності та безпеки. З іншого боку, синтез різних типів механізмів залежить від знання їхніх властивостей і взаємодії з іншими елементами системи [1]. Одна з основних проблем полягає в тому, що складні механічні системи зазвичай складаються з багатьох взаємодіючих елементів, які можуть мати різні типи руху та взаємодії. До того ж навіть невеликі зміни в одному елементі можуть суттєво впливати на поведінку всієї системи [2].

Інша проблема полягає у складності аналізу й синтезу різних типів механізмів, оскільки вони можуть мати різні масштаби та рівні складності.

Наприклад, механізми можуть бути складнішими за внутрішню структуру або потребувати використання різних матеріалів і технологій виготовлення [3; 4]. До того ж, є проблема вибору оптимальних параметрів механізмів, що визначають їхню ефективність і безпеку. Це може виявитися особливо непростим для складних механічних систем, де зміни в одному параметрі можуть вплинути на інші [5].

З огляду на вищезазначене дослідження властивостей складних механічних систем у контексті аналізу й синтезу різних типів механізмів є важливим напрямом у галузі механіки. Це дає змогу розробляти більш ефективні й безпечні механічні системи, що відповідають потребам ринку та суспільства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню механічних систем присвячено значну частину профільних наукових досліджень



і публікацій. В актуальному періоді пошуку варто виокремити низку релевантних праць.

У статті А. Мерсьє та Л. Жезекель (А. Mercier & L. Jézéquel) [6] досліджено механічні системи з нестабільністю через тертя із використанням теорії ймовірностей для моделювання невизначеності параметрів. Запропоновано модифікований метод із використанням поліномів Чебишева для уникнення числової інтеграції, що забезпечує розумний час обчислення та уникнення апроксимації стохастичних узагальнених сил.

У дослідженні Й. Жу, Г. Ли, С. Вей та С. Сонг (J. Zhu, H. Li, S. Wei & S. Song) [7] запропоновано ефективне рішення для кількісної оцінки невизначеності конформних контактів у складних механічних системах із використанням замінних моделей для зменшення обчислювального навантаження. Результати дослідження показують, що запропоноване рішення допомагає зменшити обчислювальні витрати на кількісну оцінку невизначеності в складних механічних системах із конформними контактами, що, зокрема, продемонстровано на прикладі системи «насос-підшипник» аеродвигуна.

Дослідження Г. Янг, Й. Їанг, Г. Чен та Й. Жао (H. Yang, J. Jiang, G. Chen & J. Zhao) [8] пропонує новий метод на основі глибокого навчання для ідентифікації динамічних навантажень. Метод використовує глибоку згорткову нейронну мережу, що уникає проблеми розв'язання параметрів моделі, і пряму модель між вібраційною відповіддю та зовнішнім навантаженням. Результати показують високу точність і стійкість до шуму методу, що можна використати в різних інженерних застосуваннях із системами з невизначеними параметрами й різними розподілами точок вимірювання та частотними даними.

У статті К. Фенг, Й. Ц. І, Я. Ні та М. Бер (K. Feng, J. C. Ji, Q. Ni & M. Beer) [9] проведено огляд поточних досліджень вібраційного моніторингу зносу зубчастих передач і вказано на обмеження використання вібраційних технік через складність ідентифікації вібраційних характеристик. Стаття надає рекомендації для подальших досліджень у цій галузі з метою розроблення ефективних технік на основі вібрацій для моніторингу зносу зубчастих передач і передбачення залишкового ресурсу, що може мати значення для промислових застосувань.

У роботі Й. Хао та ін. (J. Hao et al.) [10] запропоновано модель для оцінювання ефекту динамічних навантажень на систему шпинделя з вбудованим двигуном. У моделі враховано такі зовнішні

динамічні навантаження, як неузгоджені магнітні сили, нелінійну відновлювальну силу підшипника й ексцентриситет системи. Запропоновано проєкційну модель для узагальнення динаміки, а також модель додаткового моменту, які враховують зміну магнітного шляху через динамічний зсув ротора. Отримані числові результати можна підтвердити експериментально.

Отже, констатуємо, що в актуальному горизонті пошуку серед релевантних публікацій є досить широка вибірка наукових праць, які досліджують безпосередньо характеристики складних механічних систем, однак малодослідженими є аспекти параметричного аналізу механізмів саме в контексті синтезу останніх. Зокрема, відсутній аналіз програмних засобів для синтезу й аналізу складних механічних систем.

**Формулювання цілей статті** (постановка завдання). Мета дослідження – визначення оптимального програмного засобу для синтезу й параметричного аналізу складних механічних систем.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз відкритих джерел в системі *World Wide Web* дає змогу виокремити релевантні програмні засоби, що допомагають виконувати синтез та аналіз складних механічних систем (табл. 1).

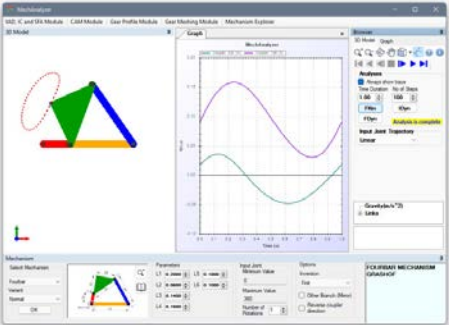
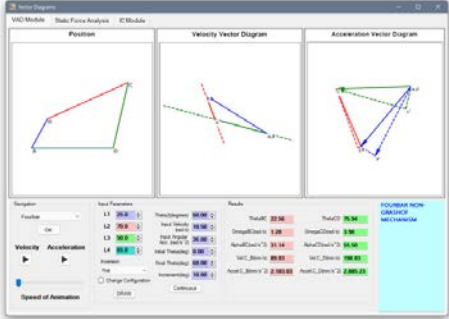
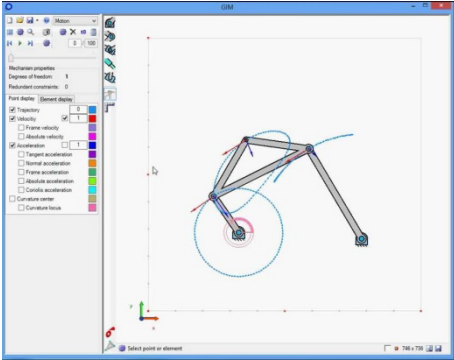
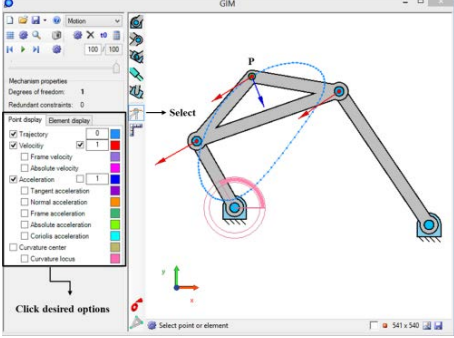
Отже, наголосимо, *MechAnalyzer Software*, *GIM Software*, *MechDesigner Software*, *Mechanism Generator SolidWorks* і *Mechanism Developer (MechDev)* – це п'ять потужних програм для синтезу й аналізу складних механізмів. Вони дають змогу моделювати різні типи механізмів, зокрема зубчасті колеса, ланцюгові передачі, кривошипно-повздовжні механізми, кулачкові механізми та інші. Кожна із цих програм має свої особливості й переваги. *MechAnalyzer Software* і *GIM Software* забезпечують детальний аналіз динаміки механізмів, зокрема визначення швидкостей, прискорень і моментів на різних точках механізму, а також можливість виконання оптимізації механізмів.

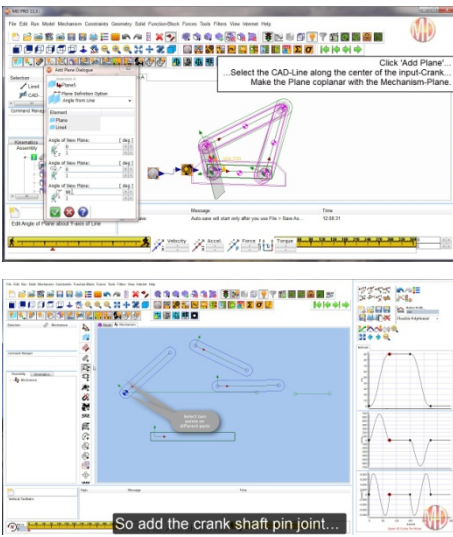
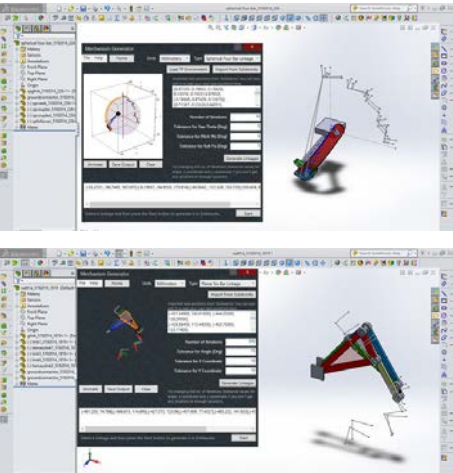
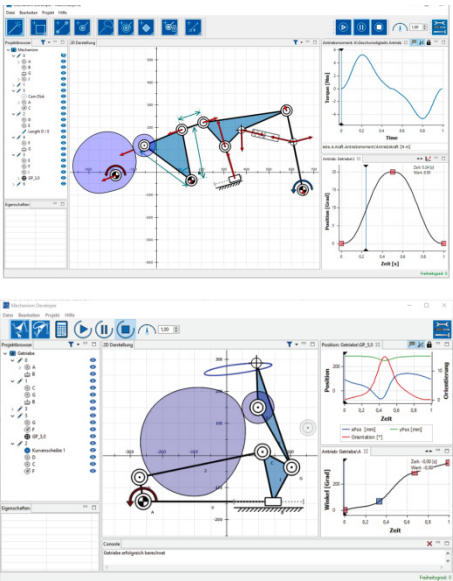
*MechDesigner Software* і *Mechanism Generator SolidWorks* є інтегрованими з програмами *CAD* і забезпечують широкі можливості для моделювання та відлагодження механізмів, зокрема графічний інтерфейс та інструменти для визначення кінематичних і кінетичних параметрів.

*Mechanism Developer (MechDev)* має інтуїтивний інтерфейс і підтримує імпорт та експорт моделей у різних форматах, як-от *STEP*, *IGES* і *STL*.

Усі перераховані програмні засоби призначені для синтезу й аналізу складних механізмів. Розглянуті програмні продукти пропонують схожі можливості для моделювання різних механізмів,

Характеристика програмних засобів для синтезу й аналізу складних механічних систем

Назва ПЗ	Загальний вид інтерфейсу	Короткий опис і посилання
<p><i>MechAnalyzer Software</i></p>	 	<p><i>MechAnalyzer Software</i> – це програмне забезпечення для синтезу й аналізу складних механізмів, яке допомагає моделювати різноманітні механізми, зокрема зубчасті колеса, ланцюгові передачі, кривошипно-повздовжні механізми, кулачкові механізми та багато інших. Програма дає змогу визначати параметри механізмів, зокрема розміри й форму елементів, а також аналізувати їхню динаміку, визначаючи швидкості, прискорення та моменти на різних точках механізму. (<a href="http://www.mechanalyzer.com/">http://www.mechanalyzer.com/</a>)</p>
<p><i>GIM Software</i></p>	 	<p><i>GIM Software</i> – програмне забезпечення для синтезу й аналізу складних механізмів із можливістю моделювання механізмів із довільною кількістю ступенів свободи, зокрема зубчастих коліс, ланцюгових передач, кривошипно-повздовжніх і кулачкових механізмів. Програма допомагає визначати кінематичні, кінетичні й динамічні характеристики механізмів і проводити аналіз динаміки, зокрема визначення швидкостей, прискорень і моментів на різних точках механізму, оцінювання впливу параметрів на динаміку механізму й визначення залишкового ресурсу. (<a href="https://www.ehu.eus/compmech/software/">https://www.ehu.eus/compmech/software/</a>)</p>

Назва ПЗ	Загальний вид інтерфейсу	Короткий опис і посилання
<p><i>MechDesigner Software</i></p>		<p><i>MechDesigner Software</i> – програмне забезпечення для синтезу й аналізу складних механізмів із графічним інтерфейсом та інструментами для відлагодження механізмів. Допомогає моделювати різноманітні механізми з кінематичними зв'язками й елементами, зокрема зубчасті колеса, ланцюгові передачі, кривошипно-повздовжні механізми, кулачкові механізми та інші, а також проводити аналіз динаміки й оптимізацію кінематичних і кінетичних параметрів. (<a href="https://psmotion.com/mechdesigner-leading-mechanism-machine-design-software">https://psmotion.com/mechdesigner-leading-mechanism-machine-design-software</a>)</p>
<p><i>Mechanism Generator SolidWorks</i></p>		<p><i>Mechanism Generator SolidWorks</i> – ПЗ для синтезу й аналізу складних механізмів, що інтегрується із програмним забезпеченням <i>SolidWorks</i>. Допомогає моделювати механізми з кількома ступенями свободи, зокрема зубчасті колеса, ланцюгові передачі, кривошипно-повздовжні механізми, кулачкові механізми та інші. <i>Mechanism Generator SolidWorks</i> визначає кінематичні й кінетичні параметри механізмів та аналізує їхню динаміку. Також дає змогу виконувати оптимізацію механізмів за різними критеріями, наприклад за мінімальною вагою або максимальною продуктивністю. (<a href="https://www.solidworks.com/partner-product/mechanism-generator">https://www.solidworks.com/partner-product/mechanism-generator</a>)</p>
<p><i>Mechanism Developer (MechDev)</i></p>		<p><i>Mechanism Developer (MechDev)</i> – програмне забезпечення для моделювання та аналізу складних механізмів із можливістю визначення кінематичних і кінетичних параметрів, аналізу динаміки, імпорту й експорту моделей у різних форматах. Допомогає моделювати різноманітні механізми з кількома ступенями свободи, зокрема зубчасті колеса, ланцюгові передачі, кривошипно-повздовжні механізми, кулачкові механізми та інші. <i>MechDev</i> розроблено <i>Machine Dynamics and Robotics of RWTH Aachen University</i> в Німеччині. (<a href="https://www.igmr.rwth-aachen.de/go/id/jkhp1/?lidz=1">https://www.igmr.rwth-aachen.de/go/id/jkhp1/?lidz=1</a>)</p>

зокрема зубчастих коліс, ланцюгових передач, кривошипно-повздовжніх механізмів і кулачкових механізмів. Крім того, ці програми забезпечують аналіз динаміки механізмів, зокрема визначення швидкостей, прискорень і моментів на різних точках механізму, оцінювання ступеня впливу відхилень параметрів на динаміку механізму й визначення кількості обертів, які може виконати механізм до виникнення зносу.

Визначення оптимального до потреб синтезу складних механічних систем та їхнього параметричного аналізу програмно-цифрового засобу серед виділеної номенклатури програмних продуктів здійснено за допомогою перехресного статистичного аналізу науково-експертних висновків і поширеності розглянутого програмного забезпечення.

Науково-експертні висновки формуються з урахуванням кількості наукових публікацій, присвячених кожному з розглянутих програмних засобів для синтезу й параметричного аналізу складних механічних систем (табл. 1), які визначають за допомогою наукометричних інструментів *Google Scholar* [11] (табл. 2).

Відповідно до наведених даних (табл. 2), найбільший науковий супровід дістало ПЗ *GIM Software* і *Mechanism Generator SolidWorks*.

Перевірку поширеності визначеної лінійки засобів синтезу й аналізу складних механізмів (табл. 1) виконано за допомогою сервісу *Google Trends* [17] (рис. 1, рис. 2, рис. 3).

Відповідно до наведених результатів про тенденційність і поширеність (рис. 1, рис. 2, рис. 3)

Таблиця 2

Результати аналітичних досліджень науково-експертних висновків

Назва ПЗ	Кількість публікацій, індексованих у <i>Google Scholar</i> [11]	Найактуальніша публікація
<i>MechAnalyzer Software</i>	60	А. Д. Дубей, С. Верма та П. Кумар (A. D. Dubey, S. Verma & P. Kumar) [12]
<i>GIM Software</i>	4210	С. Сінг та ін. (S. Singh et al.) [13]
<i>MechDesigner Software</i>	38	Р. Дікшітгаа та ін. (R. Dikshithaa et al.) [14]
<i>Mechanism Generator SolidWorks</i>	3950	М. Лю та ін. (M. Liu et al.) [15]
<i>Mechanism Developer (MechDev)</i>	518	Т. Кноблок, В. Брюнджес, М. Х'юсінг та Б. Корвес (T. Knobloch, V. Brünjes, M. Hüsing & B. Corves) [16]

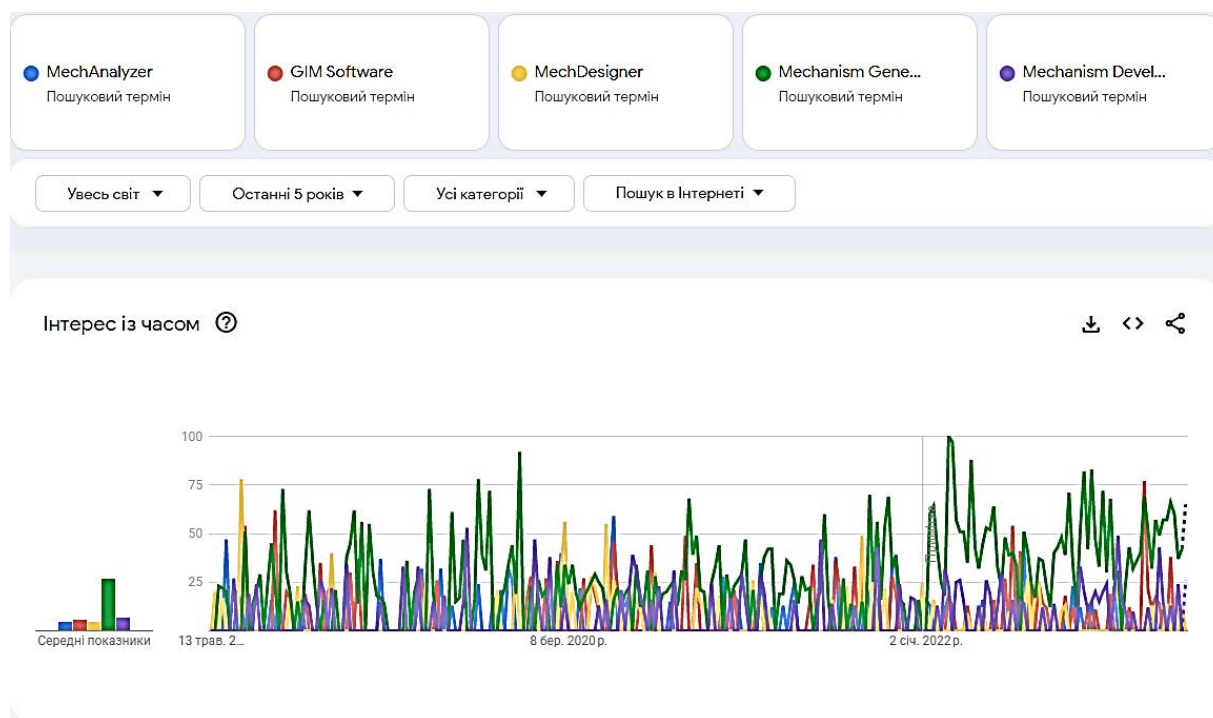


Рис. 1. Аналіз активності запитів *Google* за останні п'ять років [17]

Перехресний аналіз відносних рейтингів ПЗ для синтезу й аналізу механізмів  
*Google Scholar* [11] і *Google Trends* [17]

Назва ПЗ	Кількість публікацій, індексованих в <i>Google Scholar</i> [11]	Рейтинг <i>Google Trends</i> [17]	Відносний рейтинг <i>Google Scholar</i> [11]	Відносний рейтинг <i>Google Trends</i> [17]	Оптимізований рейтинг
<i>MechAnalyzer Software</i>	60	15	0,00137	0,079	0,080
<i>GIM Software</i>	4210	35	0,47972	0,184	0,664
<i>MechDesigner Software</i>	38	25	0,00433	0,132	0,136
<i>Mechanism GeneratorSolidWorks</i>	3950	75	0,45009	0,395	0,845
<i>Mechanism Developer (MechDev)</i>	518	40	0,05902	0,211	0,270

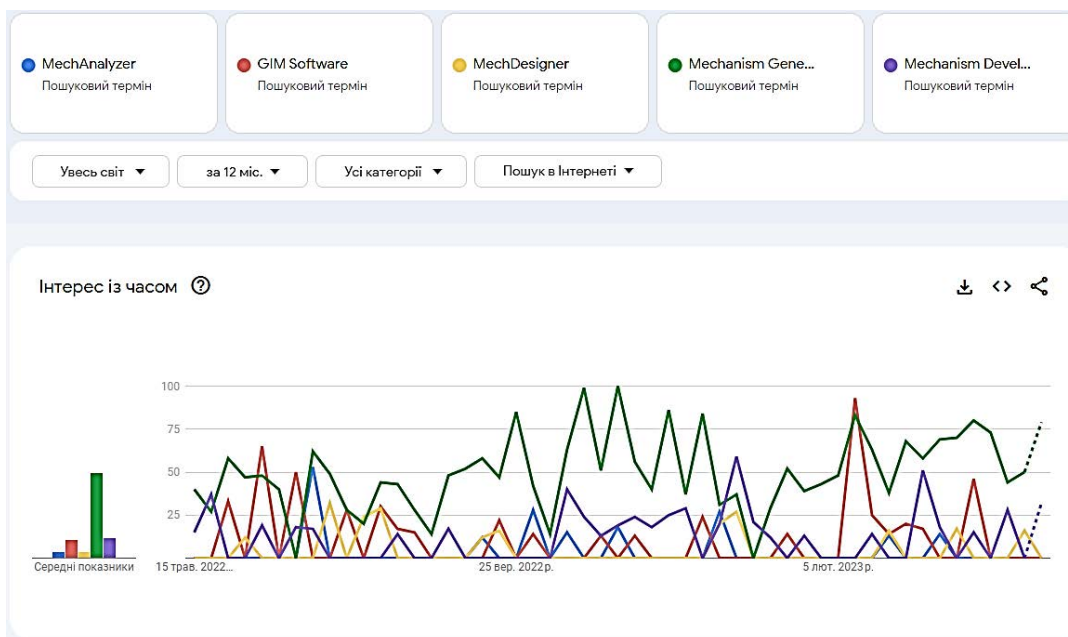


Рис. 2. Аналіз активності запитів *Google* за останній рік [17]

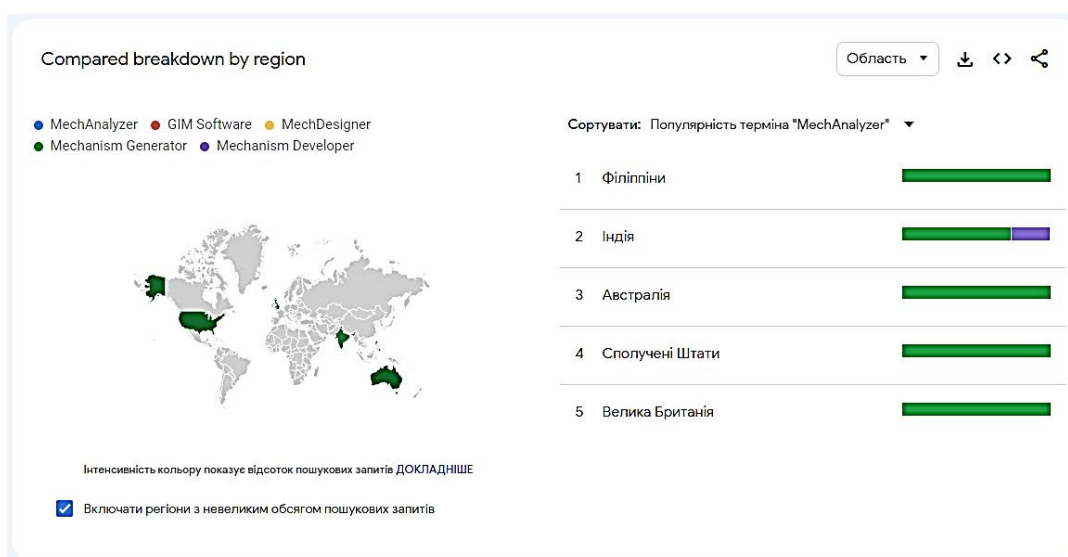


Рис. 3. Аналіз поширеності набору досліджуваних ПЗ [17]

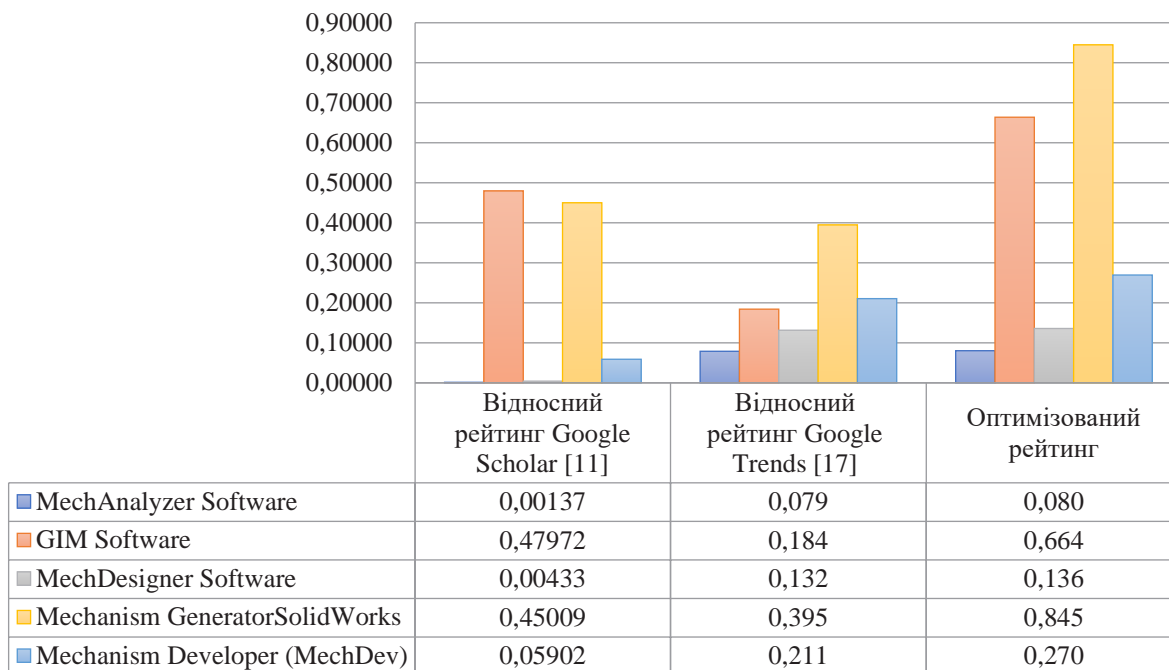


Рис. 4. Графічна інтерпретація результатів перехресного аналізу відносних рейтингів ПЗ для синтезу й аналізу механізмів *Google Scholar* [11] і *Google Trends* [17]

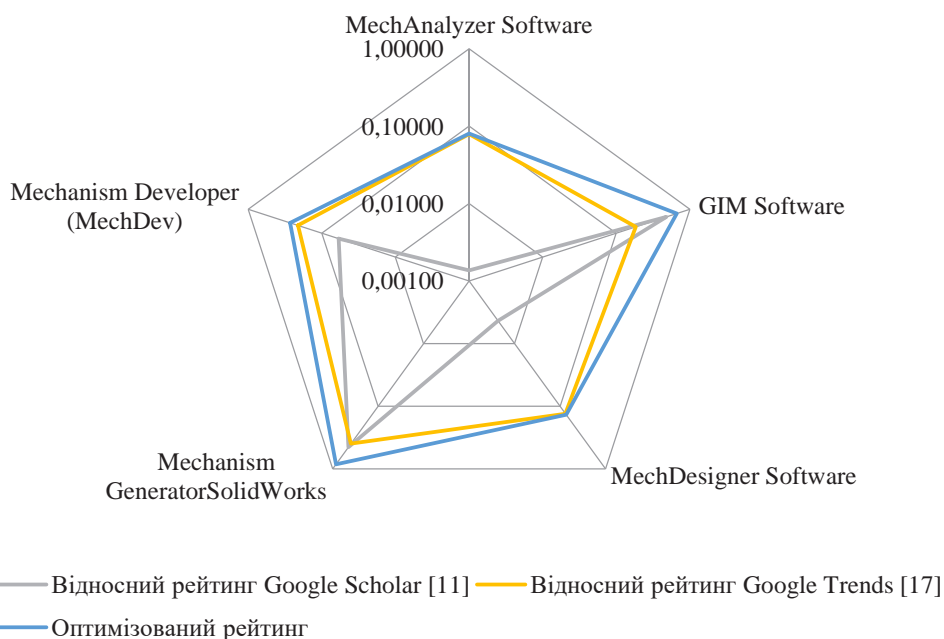


Рис. 5. Визначення оптимального ПЗ для синтезу й аналізу механізмів

виокремленої номенклатури програмних засобів (табл. 1) встановлено, що найбільш вживаними та поширеними програмними продуктами є *Mechanism Generator SolidWorks*, *GIM Software* і *Mechanism Developer (MechDev)*.

Оптимальний програмний засіб для синтезу й параметричного аналізу складних механічних

систем визначено за допомогою перехресного статистичного аналізу (табл. 3, рис. 4, рис. 5).

Отже, за результатами перехресного аналізу (табл. 3, рис. 4, рис. 5) оптимальним програмним засобом для дослідження властивостей складних механічних систем у контексті аналізу й синтезу різних типів механізмів є *Mechanism Generator SolidWorks*.

**Висновки.** За результатами розгляду предметної сфери стосовно дослідження властивостей складних механічних систем у контексті аналізу й синтезу різних типів механізмів встановлено такі аспекти:

- актуальність проблематики дослідження механізмів базується на постійному використанні механічних систем та оптимізації їхніх експлуатаційних параметрів: динамічних навантажень, вібростійкості, трибологічної витривалості, термічної стійкості тощо. Досягнути такої мети можливо з використанням цифрових інструментів і середовищ синтезу;

- більшість наукових праць спрямована на дослідження параметрів функціонування механічних систем окремих конструктивно-технічних

рішень, однак відсутні дослідження про оптимальні засоби синтезу складних механізмів і систем;

- за результатами дослідження визначено номенклатуру релевантних програмних засобів, що дають змогу виконувати синтез і параметричний аналіз складних механічних систем: *MechAnalyzer Software*, *GIM Software*, *MechDesigner Software*, *Mechanism Generator SolidWorks* і *Mechanism Developer (MechDev)*;

- відповідно до результатів перехресного аналізу визначено, що оптимальним програмним засобом для дослідження властивостей складних механічних систем у контексті аналізу й синтезу різних типів механізмів є *Mechanism Generator SolidWorks*.

### Список літератури:

1. Vaiana N., Capuano R., & Rosati L. Evaluation of path-dependent work and internal energy change for hysteretic mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 186. P. 109862. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109862> (date of access: 08.05.2023).
2. Vaiana N., Capuano R., & Rosati L. Evaluation of path-dependent work and internal energy change for hysteretic mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 186. P. 109862. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109862> (date of access: 08.05.2023).
3. Sirichotiyakul W., & Satici A. C. Data-driven passivity-based control of underactuated mechanical systems via interconnection and damping assignment. *International Journal of Control*. 2023. Vol. 96. No. 6. P. 1448–1456. URL: <https://doi.org/10.1080/00207179.2022.2051750> (date of access: 08.05.2023).
4. Celledoni E., Leone A., Murari D., & Owren B. Learning Hamiltonians of constrained mechanical systems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2023. Vol. 417. P. 114608. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.114608> (date of access: 08.05.2023).
5. Macaulay M. O., & Shafiee M. Machine learning techniques for robotic and autonomous inspection of mechanical systems and civil infrastructure. *Autonomous Intelligent Systems*. 2022. Vol. 2. No. 1. P. 8. URL: <https://doi.org/10.1007/s43684-022-00025-3> (date of access: 08.05.2023).
6. Jiang D., Chen T., Xie J., Cui W., & Song B. A mechanical system reliability degradation analysis and remaining life estimation method—With the example of an aircraft hatch lock mechanism. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 230. P. 108922. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108922> (date of access: 08.05.2023).
7. Mercier A., & Jézéquel L. Nonlinear and stochastic analysis of dynamical instabilities based on Chebyshev polynomial properties and applied to a mechanical system with friction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 189. P. 110051. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.110051> (date of access: 08.05.2023).
8. Zhu J., Li H., Wei S., & Song S. A framework for uncertainty quantification of mixed lubrication of conformal contacts in multilevel systems. *Advances in Engineering Software*. 2023. Vol. 176. P. 103396.
9. Yang H., Jiang J., Chen G., & Zhao J. Dynamic load identification based on deep convolution neural network. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 185. P. 109757. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109757> (date of access: 08.05.2023).
10. Feng K., Ji J. C., Ni Q., & Beer M. A review of vibration-based gear wear monitoring and prediction techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 182. P. 109605. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109605> (date of access: 08.05.2023).
11. Hao J., Yao Z., Li C., Song W., Miao H., Xu M., & Liu Z. Dynamic characteristics analysis of asynchronous motorized spindle considering combined unbalanced magnetic pull and nonlinear bearing restoring force effects. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 185. P. 109807. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109807> (date of access: 08.05.2023).
12. Google Scholar. 2023. URL: <https://scholar.google.com/> (date of access: 08.05.2023).
13. Dubey A. D., Verma S., & Kumar P. Analysis of Double Wishbone Suspension System Using MechAnalyzer. In *Advances in Mechanical and Energy Technology: Select Proceedings of ICMEET 2021*. Singapore: Springer Nature Singapore. 2022. P. 245–255. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1618-2\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1618-2_24) (date of access: 08.05.2023).
14. Singh S., Zuber M., Hamidon M. N., Azriff Basri A., Mazlan N., & Ahmad K. A. Kinematic Investigations of a Novel Flapping Actuation Design with Mutually Perpendicular 3 Cylindrical Joint Approach for FW-Drones.

*Biomimetics*. 2023. Vol. 8. No. 2. P. 160. URL: <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020160> (date of access: 08.05.2023).

15. Dikshithaa R., Jain S., Swaminathan J., Chittawadigi R. G., & Saha S. K. MechAnalyzer: software to teach kinematics concepts related to cams, gears, and instantaneous center. In *Mechanism and Machine Science: Select Proceedings of Asian MMS 2018*. Springer Singapore. 2021. P. 135–149. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4477-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4477-4_10) (date of access: 08.05.2023).

16. Liu M., Grinberg Dana A., Johnson M. S., Goldman M. J., Jocher A., Payne A. M., ... & Green W. H. Reaction mechanism generator v3. 0: advances in automatic mechanism generation. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 2021. Vol. 61. No. 6. P. 2686–2696. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.0c01480> (date of access: 08.05.2023).

17. Knobloch T., Brünjes V., Hüsing M., & Corves B. Analyse von Koppel-, Kurven, Räder- und Räderkoppelgetrieben mit Mechanism Developer (MechDev). *GETRIEBETAGUNG*. 2022. Vol. 23. URL: <https://d-nb.info/1268673331/34#page=25> (date of access: 08.05.2023).

18. Google Trends. 2023. URL: <https://trends.google.com/home> (date of access: 08.05.2023).

### **Kaidash M.D. RESEARCH OF THE PROPERTIES OF COMPLEX MECHANICAL SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF DIFFERENT TYPES OF MECHANISMS**

*The article deals with the problems of researching the properties of complex mechanical systems in the context of the analysis and synthesis of various types of mechanisms. The relevance of this issue is emphasized, since mechanical systems are widely used in various fields of engineering and production, therefore, optimizing their operational parameters is an important task. The study of the parameters of the functioning of mechanical systems is the subject of many scientific works, but there are no studies on the optimal means of synthesis of complex mechanisms and systems. Based on the results of the examination of the subject area, a nomenclature of software tools was determined that allow the synthesis and parametric analysis of complex mechanical systems, including MechAnalyzer Software, GIM Software, MechDesigner Software, Mechanism Generator SolidWorks and Mechanism Developer (MechDev).*

*During the cross-analysis, it was determined that the most the optimal software tool for studying the properties of complex mechanical systems in the context of analysis and synthesis of various types of mechanisms is Mechanism Generator SolidWorks. Using an optimal software tool for studying the properties of complex mechanical systems is an important task in modern mechanical engineering. The practical significance lies in the possibility of using the optimal software tool for the development and improvement of mechanical systems in various industries. The use of appropriate software can help improve the quality and productivity of the mechanical systems being developed and reduce the time and costs of research and design. Therefore, the determination of the optimal software tool for studying the properties of complex mechanical systems has important scientific and practical significance and can be used for the further development of mechanical engineering.*

**Key words:** *mechanical systems, synthesis, analysis, GIM Software, Mechanism Generator SolidWorks.*



УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/29>**Семичаєвський С.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Присяжнюк В.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Осадчук М.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Якіменко М.Л.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ВИПРОБУВАНЬ РУЧНИХ ПОЖЕЖНИХ ДРАБИН

У цій публікації наведено актуальність досліджень, направлених на вирішення ряду проблемних питань пов'язаних з гасінням пожеж на нижніх поверхах житлових будинків за допомогою ручних пожежних драбин.

Вказано, що ручні пожежні драбини являють собою спеціальне пожежно-технічне обладнання, що призначене для піднімання і роботи на висоті особового складу пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж та евакуації людей. Проаналізовано інформацію щодо нормативної бази країн ЄС стосовно технічних характеристик, видів та типів ручних пожежних драбин. Зазначено, що статистика пожеж, які виникають у житлових будинках в Україні свідчить про те, що близько 87,3 % пожеж відбуваються в будинках до 5 поверхів (з умовною висотою до 15 метрів). Так на підставі проведеного аналізу встановлено, що перспективним напрямком у сфері удосконалення засобів рятування та проведення аварійно-рятувальних робіт на висоті є модернізація або розроблення висувної драбини з умовною висотою підйому до 15 метрів, яка в подальшому забезпечить можливість проведення евакуації людей під час аварійно-рятувальних робіт включно до п'ятого поверху.

З'ясовано, що залежно від призначення ручні пожежні драбини поділяють на категорії та типи. Проаналізовано питання експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин. Після проведеного аналізу встановлено, що основними методами випробувань пожежних драбин під час експлуатації є: перевірка висунання та фіксації колін, випробування на міцність та прогин, а також, враховуючи специфіку кожного виду драбини можна віднести випробування різних видів гаку, опори, стійки та тягив тощо.

Наведено структуру Методики експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин. Обґрунтовано методологію випробувань ручних пожежних драбин.

Зазначено, що розроблена Інститутом державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту Методика експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин сприятиме вирішенню проблеми легітимного використання в Україні європейських зразків ручних пожежних драбин та дозволить в майбутньому якісно проводити випробування та оцінювати придатність до безпечної експлуатації ручних пожежних драбин в пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС України.

**Ключові слова:** методика випробувань, ручні пожежні драбини, технічні характеристики.

**Постановка проблеми.** Ручні пожежні драбини являють собою спеціальне пожежно-технічне обладнання, що призначене для піднімання і роботи на висоті особового складу пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж та евакуації людей.

Згідно з [1] основним оперативним завданням осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту та працівників пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж

є рятування людей у разі виникнення загрози їх життю.

Для належного виконання покладених на себе завдань пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України мають бути маневреними та мобільними, але є ряд складнощів таких як: щільні забудови, припарковані автомобілі в заборонених місцях під будівлями, що суттєво ускладнюють під'їзд пожежно-рятувальної техніки до місця виникнення надзвичайної ситуації.

Як показує практичний досвід, своєчасне забезпечення проведення аварійно-рятувальних робіт на нижніх поверхах будівель є можливим лише за допомогою ручних пожежних драбин.

В той же час, виникає ще одне проблемне питання пов'язане з тим, що з наявних ручних пожежних драбин, які перебувають в оперативних розрахунках пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України, в переважній більшості експлуатується триколінна висувна пожежна драбина, висота якої дозволяє проводити аварійно-рятувальні роботи не вище третього поверху будівлі. Це суттєво обмежує спектр можливостей проведення аварійно-рятувальних робіт.

Враховуючи вищенаведене, набуває актуальності питання нормативного врегулювання використання в Україні сучасних європейських зразків ручних пожежних драбин для розширення можливостей повноцінного проведення аварійно-рятувальних робіт.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** В Україні є чинними Правила [3], в яких передбачено вимоги до ручних пожежних драбин та проведення їх випробування.

В той же час цей нормативний документ певною мірою застарів та не містить сучасних європейських вимог до технічних характеристик, класифікації та випробування ручних пожежних драбин.

**Мета та завдання дослідження.** Для сприяння у вирішенні зазначеної проблеми з метою удосконалення нормативної бази щодо застосування та випробування ручних пожежних драбин, в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту за замовленням ДСНС України розроблено Методику експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин. Розділ 6 цієї Методики, який стосується перевірки та випробувань ручних пожежних драбин, увійде до оновлених Правил [3].

Для досягнення поставленої мети в цій публікації необхідно:

1. Проаналізувати інформацію щодо нормативної бази країн Європейського Союзу (ЄС) стосовно технічних характеристик, видів та типів ручних пожежних драбин.

2. Обґрунтувати методологію випробувань ручних пожежних драбин.

**Інформація щодо нормативної бази країн ЄС стосовно технічних характеристик, видів та типів ручних пожежних драбин**

Статистика пожеж, які виникають у житлових будинках в Україні свідчить про те, що близько

87,3% пожеж відбуваються в будинках до 5 поверхів (з умовною висотою до 15 метрів). Так на підставі проведеного аналізу встановлено, що перспективним напрямком у сфері удосконалення засобів рятування та проведення аварійно-рятувальних робіт на висоті є модернізація або розроблення висувної драбини з умовною висотою підйому до 15 метрів, яка в подальшому забезпечить можливість проведення евакуації людей під час аварійно-рятувальних робіт включно до п'ятого поверху.

Проаналізувавши нормативну базу країн ЄС [2] стосовно технічних характеристик, видів та типів ручних пожежних драбин, які там експлуатуються, було з'ясовано, що залежно від призначення ручні пожежні драбини поділяють на категорії та типи. Кожна з категорій драбин (1, 2 та 3) визначає максимальну кількість людей, які одночасно можуть перебувати на драбині, та має відповідне маркування. Кожен тип драбин за призначенням поділяється на вид робіт, в яких можна використовувати конкретну драбину, а саме: для підймання, або для рятування і підймання. Категорії за типом ручних пожежних драбин згідно [2] наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Категорії за типом ручних пожежних драбин**

Тип драбини	Максимальна кількість людей, які одночасно можуть перебувати на драбині	Призначення
Розсувні	3	Для рятування і підймання
	2	Для рятування і підймання
	1	Для підймання
Штурмові	1	Для підймання
Суцільні	3	Для рятування і підймання
	2	Для рятування і підймання
	1	Для підймання
Для роботи на дахах будівель	1	Для підймання
Секційні (телескопічні)	3	Для рятування і підймання
	2	Для рятування і підймання
	1	Для підймання
Драбини-палиці	1	Для підймання

Слід зазначити, що використання ручних пожежних драбин європейських зразків вирішують питання розширення можливостей для

повноцінного проведення аварійно-рятувальних робіт, зокрема на висоті 15 м, завдяки використанню розсувної триколінної пожежної драбини 3 категорії, що зображена на рисунку 1.



**Рис. 1. Триколінна розсувна пожежна драбини 3 категорії**

Фахівцями Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту було вивчено та проаналізовано питання експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин. Вивчено інструкції з експлуатації, ремонту та технічного обслуговування ручних пожежних драбин, а також стандарт [2]. Вимоги зазначених документів порівняли із вимогами чинних в Україні Правил [3] та національного стандарту України ДСТУ 3906-99 *Техніка пожежна. Драбини пожежні ручні. Загальні технічні умови. Зі зміною № 1*, який на сьогодні скасовано.

Після проведеного аналізу встановлено, що основними методами випробувань пожежних драбин під час експлуатації є: перевірка висування та фіксації колін, випробування на міцність та прогин, а також, враховуючи специфіку кожного виду драбини можна віднести випробування різних видів гаку, опори, стійки та тятив тощо.

#### **Обґрунтування методології випробувань ручних пожежних драбин**

На підставі аналізування вищезазначених документів розроблено *Методику експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин*, яка складається із 7 розділів та одного додатку. У першому розділі зазначено призначення та сферу застосування методики. У другому розділі наведено нормативні посилання. Третій розділ містить терміни та визначення понять. У четвертому розділі наведено загальні положення. П'ятий розділ

стосується засобів вимірювань. Шостий розділ стосується безпосередньо перевірки та випробувань ручних пожежних драбин. В цьому розділі зазначено вимоги безпеки праці під час випробувань та експлуатації ручних пожежних драбин. В додатку А міститься форма протоколу випробувань ручних пожежних драбин.

Усі ручні пожежні драбини піддаються обов'язковим перевіркам. Забороняється використовувати драбини, що мають несправності та пошкодження основних частин, які виявлені під час їх перевірки.

Випробування розсувних пожежних драбини складається з таких етапів: перевірка висування та фіксації колін, випробування на міцність (драбина та мотузка) і прогин. Усі драбини довжиною понад 11 м випробовують за такими методами: перевірка висування та фіксації колін, випробування на прогин та перевірка стійок, випробуванням на міцність.

Випробування штурмових пожежних драбини складається з випробування на міцність тятив та гака.

Випробування суцільних пожежних драбини складається з випробувань на міцність.

Випробування пожежних драбин для роботи на дахах будівель складається з випробування на міцність тятив та гака.

Випробування секційних (телескопічних) пожежних драбин складається з двох етапів: перевірка фіксації упорів та випробування на міцність.

Випробування пожежних драбини-палиць складається з перевірки розкладання-складання та випробування на міцність тятив.

Розроблена Інститутом державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту *Методика експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин* сприятиме вирішенню проблеми легітимного використання в Україні європейських зразків ручних пожежних драбин та дозволить в майбутньому якісно проводити випробування та оцінювати придатність до безпечної експлуатації ручних пожежних драбин в пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС України.

#### **Висновки:**

1. Проаналізовано інформацію щодо нормативної бази країн ЄС стосовно технічних характеристик, видів та типів ручних пожежних драбин.

2. Встановлено основні методи випробувань пожежних драбин під час їх експлуатації.

2. Обґрунтовано методологію випробувань ручних пожежних драбин.

**Список літератури:**

1. Статут дій органів управління та підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж, затверджений Наказом Міністерства внутрішніх справ України від 26 квітня 2018 року № 340 (із змінами, внесеними згідно з наказом Міністерства внутрішніх справ № 761 від 18.10.2021).
2. ДСТУ EN 1147:2021 (EN 1147:2010, IDT). Дроби́ни пожежні ручні. – Введ. 2021-05-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 38 с.
3. Правила безпеки праці в органах і підрозділах МНС України, затверджені Наказом МНС України від 07.05.2007 № 312/ УкрНДНЦ. 2007.

**Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Osadchuk M.V., Yakimenko M.L.**

**JUSTIFICATION OF TESTING METHODOLOGY OF MANUAL FIRE LADDERS**

*This publication shows the relevance of research aimed at solving a number of problematic issues related to extinguishing fires on the lower floors of residential buildings using manual fire ladders.*

*It is indicated that manual fire ladders are special fire-technical equipment designed for lifting and working at heights of personnel of fire-rescue units during fire extinguishing and evacuation of people. Information on the regulatory framework of the EU countries regarding technical characteristics, types and types of manual fire ladders has been analyzed. It is noted that the statistics of fires that occur in residential buildings in Ukraine indicate that about 87.3% of fires occur in buildings with up to 5 floors (with a nominal height of up to 15 meters). Thus, on the basis of the conducted analysis, it was established that a promising direction in the field of improving rescue equipment and carrying out emergency and rescue work at height is the modernization or development of a retractable ladder with a conditional lifting height of up to 15 meters, which will in the future provide the possibility of evacuating people during emergency and rescue operations. works up to and including the fifth floor.*

*It was found that depending on the purpose, manual fire ladders are divided into categories and types. The issue of operational tests of manual fire ladders has been analyzed. After the analysis, it was established that the main methods of testing fire ladders during operation are: checking the extension and fixation of knees, strength and deflection tests, and also, taking into account the specifics of each type of ladder, it is possible to include tests of various types of hooks, supports, struts and bowstrings, etc.*

*The structure of the Methodology of operational tests of manual fire ladders is given. The methodology of testing manual fire ladders is substantiated.*

*It is noted that the Methodology of operational tests of manual fire ladders developed by the Institute of Public Administration and Research in Civil Protection will contribute to solving the problem of the legitimate use of European models of manual fire ladders in Ukraine and will allow in the future to carry out quality tests and assess the suitability for safe operation of manual fire ladders in firefighting rescue units of the State Emergency Service of Ukraine.*

**Key words:** *manual fire ladders, technical characteristics, test methodology.*

## Відомості про авторів

**Абдулін М.З.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Арінушкіна Н.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**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

**Бстін Ю.О.** – студент 4 курсу групи ТС-91ф кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Богза М.С.** – аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Боянівський В.П.** – аспірант 4 курсу групи ТП-91ф кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Васілова Г.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Державного університету інфраструктури та технологій

**Ватуля Г.Л.** – доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Навчально-наукового інституту будівельної та цивільної інженерії Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Волощук В.А.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Вольчин І.А.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України; професор кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій

**Гікало П.В.** – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Грищенко Т.М.** – старший викладач кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Грушевська Т.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Державного університету інфраструктури та технологій

**Данилейко О.О.** – інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна 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»

**Дощенко Г.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії

**Дудукова С.В.** – завідувачка сектора стандартизації продукції льону і конопель Інституту луб'яних культур Національної академії аграрних наук України

**Єфімова В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Зайцева І.С.** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Кагляк О.Д.** – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача 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»

**Кайдаш М.Д.** – кандидат технічних наук, професор кафедри технологій зварювання і будівництва Національного університету «Чернігівська політехніка»

**Качоровська О.П.** – старший викладач кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Климась Р.В.** – кандидат технічних наук, начальник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Козенок А.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і логістики Державного біотехнологічного університету

**Колодницька Р.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка»

**Лигун Ю.Ю.** – студентка факультету управління залізничним транспортом Державного університету інфраструктури та технологій

**Літвинчук С.І.** – кандидат технічних наук., доцент, завідувач кафедри фізики Національного університету харчових технологій

**Ловська А.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

**Лозовський В.Г.** – аспірант Льотної академії Національного авіаційного університету

**Максимов І.І.** – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри вищої математики та фізики Криворізького національного університету

**Максимова І.І.** – кандидат економічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри міжнародних відносин Державного університету економіки і технологій

**Маринін А.І.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

**Мельник О.Є.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та обладнання Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

**Мельник О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Мокрецький В.О.** – аспірант кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій

**Наговський Д.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматизації Херсонської державної морської академії

**Некрасевич О.В.** – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Несенюк Л.П.** – молодший науковий співробітник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Ніжник В.В.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Нікольський В.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету «Одеська морська академія»

**Нікольський М.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія»

**Обушенко Т.І.** – старший викладач кафедри технології неорганічних речовин, водочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Осадчук М.В.** – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Павленко В.Я.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Панайотова Т.Д.** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Петраченко Д.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу інженерно-технічних досліджень Інституту луб'яних культур Національної академії аграрних наук України

**Пилипенко І.В.** – кандидат хімічних наук, старший викладач кафедри хімічної технології кераміки та скла Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пилипенко О.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Пилипенко Т.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Позняк О.М.** – молодший науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

**Присяжнюк В.В.** – начальник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Провалов О.Ю.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

**Рагулін С.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності Льотної академії Національного авіаційного університету

**Санжаровська В.В.** – магістр кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Святненко Р.С.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

**Семичаєвський С.В.** – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Серета Д.В.** – науковий співробітник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Сіора О.В.** – науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Слободянюк В.К.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету

**Слободянюк М.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри корабельної енергетики та електроенергетичних систем Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

**Смірнов О.О.** – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Національного наукового центру «Інститут судових експертиз імені Заслуженого професора М.С. Бокаріуса»

**Спасьонова Л.М.** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології кераміки та скла хіміко-технологічного факультету 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

**Торопов Б.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Державного університету інфраструктури та технологій

**Трюхан О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації авіаційних робіт та послуг Національного авіаційного університету

**Фроленкова С.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Чорна В.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри систем автоматизації та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Шамсутдінова Н.О.** – інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України; магістр 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»

**Шарабайко О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри військової підготовки Льотної академії Національного авіаційного університету

**Шевченко О.Ю.** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

**Якіменко М.Л.** – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 34 (73) № 3 2023**

**Частина 2**

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](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. 17,5. Ум. друк. арк. 20,69. Зам. № 0723/453

Підписано до друку 11.07.2023. 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.