



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 207

Харків 2024

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: <https://bit.ly/3vVHlv3>.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

Google Scholar профіль: <https://scholar.google.com.ua>

Веб-сторінка збірника: <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

Реферативна база

«Наукова періодика України»: <http://csw.kart.edu.ua>

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПП від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 3 від 22 березня 2024 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Харін Роман Олександрович, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзьяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-Universität Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku University, Японія)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.
(VGTU, Литва)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська політехніка»)
Церклевич А. Л., д.т.н., доцент (НУ «Львівська політехніка»)
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Теплоенергетика (144)

- Бурда Ю. О., Півненко Ю. О., Череднік А. Д., Логвіненко О. А., Редько І. О.*
Аналіз залежності вмісту нафталіну в коксовому газі від температури і тиску 6
- Редько А. О., Редько О. Ф., Каграманян А. О., Батюта М. М.,
Краснопольський Д. І.* Прогнозування температурного режиму підземного
колектора геотермальної циркуляційної системи теплопостачання 14

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Андрієвський В. П., Мартинюк І. Ю., Максим'юк О. В.* Дослідження збіжності
поліномів і методу скінченних елементів з урахуванням пластичних
властивостей матеріалу 24
- Плугін А. А., Муригін М. А., Крикун О. П., Наджафов Е. Ф., Зінченко В. В.*
Експериментальні дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні
процеси в залізобетонних шпалах 38
- Плугін А. А., Жван В. Д., Лобяк О. В., Назаренко О. М., Микитась С. В.*
Прогнозування остаточного ресурсу металеві димові труби кольорової
металургії 51

Залізничний транспорт (273)

- Калабухін Ю. Є., Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Мартинов С. І.* Науково-
методичний підхід до визначення виробничої собівартості деповського
ремонт пасажирських вагонів 66
- Потапов Д. О., Вітольберг В. Г., Чесак С. С.* Аналітичний огляд сучасних
методів оцінювання стану залізничної колії 76

Транспортні технології (275)

- Хітров І. О.* Використання платформи електронного навчання Moodle
для освітньої компоненти «Транспортні засоби» 90
- Ромах В. Л., Тихонін В. І., Тихоніна І. І.* Вплив характеристик зернових
вантажів на вибір складського обладнання вантажного терміналу порту 98
- Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А.* Топологія системи збору
енергії для великомасштабних сонячних електростанцій за рахунок
двоступеневого диференціального перетворювача потужності 107

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 66.074

**АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТІ ВМІСТУ НАФТАЛІНУ В КОКСОВОМУ ГАЗІ
ВІД ТЕМПЕРАТУРИ І ТИСКУ**

Кандидати техн. наук Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко, А. Д. Череднік, О. А. Логвіненко,
д-р техн. наук І. О. Редько

**ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF NAPHTHALENE CONTENT
IN COKE OVEN GAS ON TEMPERATURE AND PRESSURE**

PhD (Tech.) Y. O. Burda, PhD (Tech.) Y. O. Pivnenko, PhD (Tech.) A. D. Cherednik,
PhD (Tech.) O. A. Lohvinenko, Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko

***Анотація.** Дослідження фокусується на аналізі відношення кількості нафталіну в коксовому газі до змін температури і тиску. Мета дослідження – вивчення впливу цих параметрів на концентрацію нафталіну в газовій фазі. Основний акцент зроблено на аналізі температурних і тискових умов, які можуть сприяти ефективному зниженню вмісту нафталіну в коксовому газі. Результати експериментів підтвердили, що зі збільшенням тиску та зниженням температури відбувається істотне зменшення концентрації нафталіну. Однак, з урахуванням важливості екологічних аспектів, виявлено, що мокре газоочищення недостатньо ефективно для досягнення необхідного рівня очищення від нафталіну.*

***Ключові слова:** газоочищення, нафталін, скруббер, екологія, аналіз експериментів, коксовий газ.*

***Abstract.** The study is dedicated to analyzing the dependence of naphthalene content in coke oven gas on temperature and pressure. The research aimed to investigate the influence of these parameters on the concentration of naphthalene in the gas phase. The primary focus was on studying temperature and pressure conditions that could effectively reduce the naphthalene content in coke oven gas.*

The experimental results demonstrated a significant decrease in naphthalene concentration with increasing pressure and decreasing temperature. However, considering the importance of environmental aspects, it was found that wet gas cleaning is insufficient to achieve the required level of naphthalene removal.

The use of packing-type scrubbers was proposed as an effective method for reducing naphthalene concentration in coke oven gas. They provide a high level of gas purification while maintaining high productivity and the possibility of reusing the obtained results in production. This approach may prove to be promising in addressing environmental conservation and optimizing technological processes in coke oven gas production.

In addition to the proposed use of packing-type scrubbers, further investigation explored the impact of residence time on naphthalene removal efficiency. The study revealed that longer residence times in the scrubbers led to enhanced removal of naphthalene, highlighting the importance of contact time between the gas and the scrubbing medium.

Moreover, the research delved into the economic feasibility of implementing these scrubbers in coke oven gas production facilities. Cost-benefit analyses indicated that while the initial investment might be significant, the long-term advantages, including improved environmental compliance and operational efficiency, justified the expenses.

To enhance the practical application of the findings, the study considered the scalability of the proposed scrubbing method for different coke oven gas production scales. The results demonstrated that the approach could be adapted for both large-scale industrial operations and smaller facilities, making it a versatile solution for various settings.

Furthermore, the study investigated the potential by-products or waste generated during the scrubbing process.

Keywords: gas purification, naphthalene, scrubber, ecology, experimental analysis, coke oven gas.

Вступ. Дослідження фокусується на розгляді взаємозв'язку між вмістом нафталіну в коксовому газі та змінами температури і тиску. Основна мета полягає у визначенні впливу цих параметрів на концентрацію нафталіну в газовій фазі. Основний акцент робиться на аналізі температурних і тискових умов, які можуть сприяти ефективному зниженню вмісту нафталіну в коксовому газі.

За результатами експерименту встановлено, що зі збільшенням тиску та зниженням температури спостерігається значне зменшення концентрації нафталіну. Однак, враховуючи важливість екологічних аспектів, виявлено, що метод мокрого газоочищення не є достатньо ефективним для досягнення необхідного рівня очищення від нафталіну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні нові дослідження та публікації, спрямовані на зниження вмісту нафталіну в коксовому газі, свідчать про зростаючий інтерес до розробок, спрямованих на покращення екологічних показників промислових виробництв. Однією з ключових тем досліджень є оптимізація процесів мокрого газоочищення та розуміння впливу температури і тиску на концентрацію нафталіну в газовій фазі [1].

Суттєвою частиною обговорень є урахування переваг та обмежень різних технічних рішень, а також можливостей їхнього впровадження в наявні виробництва. Зокрема, окремі дослідження

фокусується на вдосконаленні параметрів скрубберів, таких як час очищення та конструкційні особливості, з метою оптимізації їхньої ефективності та стабільності [2].

Ці нові підходи відображують перспективи розвитку методів очищення коксового газу від нафталіну, сприяючи впровадженню ефективних та екологічно безпечних технологій у промисловості. У той же час вирішення питань енерго-ефективності та економічної доцільності залишається актуальним завданням для науковців та інженерів у цій галузі.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження полягає в ретельному аналізі відношення між вмістом нафталіну в коксовому газі та змінами температури і тиску; встановленні впливу цих параметрів на концентрацію нафталіну в газовій фазі. Дослідження спрямоване на виявлення температурних і тискових умов, які сприяють ефективному зниженню вмісту нафталіну в коксовому газі.

Завдання дослідження включають аналіз впливу збільшення тиску та зниження температури на значне зменшення концентрації нафталіну в газовій фазі. Важливо враховувати екологічні аспекти, оскільки результати експериментів підтверджують, що мокре газоочищення може виявитися не досить ефективним для досягнення необхідного рівня очищення від нафталіну. Отже, увагу приділено розробленню та оптимізації методів,

зокрема використання скрубберів насадкового типу, зниження концентрації нафталіну в коксовому газі та забезпечення ефективних і екологічно безпечних технологій у промисловості.

Основна частина досліджень. В Україні серйозною проблемою є забруднення атмосферного повітря внаслідок промислової діяльності. Наприклад, у 2022 році викиди на душу населення становили 112 кг, що свідчить про зростання забруднення порівняно з 2021 роком (101 кг). Це вказує на застарілість і потребу реконструкції засобів очищення викидів промисловості в атмосферу.

Більшість підприємств чорної металургії обладнані цехами коксування газу, які викидають в атмосферу коксовий газ із високою концентрацією пилу та інших шкідливих сполук.

Аварії в промисловості також призводять до погіршення екологічної ситуації в регіоні. При будівництві потужних промислових об'єктів, зокрема в чорній металургії, важливо вирішувати

питання вентиляції, газоочищення та аспірації.

Негативні впливи антропогенного походження на атмосферу включають значне підвищення рівнів CO та CO₂, викиди надлишкових сполук сірки, а також фенолів, сполук азоту, хлору і фтору. Крім того, в атмосферу потрапляє додаткове тепло.

Важливим аспектом є також викиди в повітря речовин під час виробництва кольорових металів, що утворюються при згоранні алюмінію, міді, свинцю, олова, цинку, нікелю тощо.

Нижче наведено діаграму компонентів шкідливих викидів від кольорової металургії (рис. 1).

В атмосферу викидаються різні речовини в результаті діяльності хімічної та нафтохімічної промисловості, яка охоплює виробництво кислот, гумових виробів, пластичних мас, барвників, мийних засобів, штучного каучуку, мінеральних добрив, розчинників, крекінгу нафти та інших продуктів [4].



Рис. 1. Концентрація шкідливих речовин кольорової металургії

У хімічній технології поділ газових неоднорідних систем вважається одним із основних процесів. Утворення пилу може статися внаслідок механічного подрібнення твердих тіл, таких як дроблення, стирання, розмелювання, транспортування, а також під час горіння палива, конденсації парів і

хімічної взаємодії газів, що супроводжується утворенням твердого продукту [5].

Отриманий у таких процесах пил містить тверді частинки розмірами 5-102 мкм і містить речовини, що утворюються внаслідок конденсації парів

(нафтові дими, смоли, сірчана кислота тощо) у вигляді дуже дрібних частинок розмірами від 0,004 до 1,4 мкм.

Пил містить тверді частинки розміром від 1 до 551 мкм; дими – від 0,3 до 1,1 мкм. Тумани складаються з крапельок рідини розміром 0,03-5 мкм. Утворюються вони в результаті конденсації пари чи при розпиленні рідини в газі.

Залежність тиску насичених парів нафталіну розрахована за рівнянням

$$L_g P_t^H = 5,8099 - \frac{978,66}{78,11+t} \quad (1)$$

Газ, отриманий у результаті процесу коксування вугілля, відомий як коксовий газ, має велике значення для металургійної

промисловості. До його складу входять різні вуглеводні, зокрема ароматичні сполуки, такі як нафталін. Дослідження залежності вмісту нафталіну в коксовому газі від температури і тиску стає ключовим завданням для оптимізації цього процесу (табл. 1).

Нафталін, що є ароматичним вуглеводнем, може впливати на характеристики коксового газу та його використання в промислових процесах. Зокрема, його можна використовувати як вихідний матеріал для виробництва хімічних продуктів, таких як фарби, синтетичні полімери та інші важливі речовини.

Таблиця 1

Характеристика параметра оптимізації

Номер	Характеристика речовини					
	Головні позначення	Значення	Назва	Розмірність	Область значення	Точність
1	C_t	у	Пари нафталіну	г/100 нм ³ газу	[0; ∞]	5 %

Присутність нафталіну визначає фізичні та хімічні характеристики коксового газу, роблячи його ключовим компонентом для різних промислових застосувань. Використання нафталіну як вихідного матеріалу відкриває можливості для отримання різноманітних хімічних сполук, включаючи фарби, синтетичні полімери та інші продукти, що є важливими для промисловості [6].

Також нафталін може взаємодіяти з фізичними характеристиками коксового газу, визначаючи його щільність, температурний режим та інші параметри, які впливають на транспортування та використання в промислових процесах.

Слід зазначити, що розуміння ролі нафталіну в контексті коксового газу має ключове значення для розроблення

ефективних стратегій очищення та використання цього газового продукту. Такий підхід сприяє не лише підвищенню виробничої ефективності, але й створенню більш сталого та екологічно чистого виробництва.

Температурні умови впливають на хімічні реакції, пов'язані з утворенням і розкладанням нафталіну в коксовому газі. Збільшення температури може призводити до зростання вмісту нафталіну через певні кінетичні ефекти. Однак важливо визначити оптимальний діапазон температур для максимального виходу нафталіну та уникнення небажаних побічних реакцій.

Тиск є іншим важливим фактором, який визначає характеристики газу. Зміна тиску може впливати на рівновагу хімічних реакцій у системі, включаючи ті, які

стосуються нафталіну. Дослідження залежності вмісту нафталіну від тиску допоможе розуміти, як зміни в тискових умовах впливають на кількість нафталіну в коксовому газі.

Зміни в тискових умовах можуть впливати на утворення та розкладання нафталіну в коксовому газі через зміну концентрацій вихідних речовин і продуктів реакції. Підвищення тиску може призводити до збільшення вмісту нафталіну через зміщення хімічної рівноваги в бік утворення цього ароматичного вуглеводню. Важливо враховувати, що високий тиск також може стимулювати конкуруючі хімічні реакції, що впливають на кількість нафталіну та його вихід [7].

Крім того, вплив тискових змін може охоплювати фізичні характеристики газу, такі як щільність і об'єм, що впливає на транспортування та використання коксового газу у виробництві. Аналіз таких аспектів має вирішальне значення для вдосконалення технологічних процесів і ефективного використання коксового газу в промисловості, забезпечуючи оптимальні умови для утворення та використання нафталіну.

Розгляд залежності вмісту нафталіну в коксовому газі від температури є ключовим аспектом для розуміння та оптимізації виробництва. Температурні умови визначають характер хімічних реакцій, які відбуваються під час коксування вугілля та утворення коксового газу.

Підвищення температури може призводити до збільшення вмісту нафталіну через активізацію відповідних хімічних реакцій. У високих температурних умовах відбувається термічний розклад більш важких вуглеводнів, що може бути причиною утворення нафталіну та інших ароматичних вуглеводнів [9].

Проте слід зазначити, що існує оптимальний температурний діапазон для максимального утворення нафталіну без

значного утворення непотрібних побічних продуктів. Регулювання температурних умов є вирішальним для досягнення ефективного виробництва та забезпечення високого виходу цього ароматичного вуглеводня.

Крім того, розуміння впливу температури дає змогу визначити оптимальні умови для реакцій утворення нафталіну і сприяє розробленню технологій очищення коксового газу. Це може суттєво впливати на якість коксового газу та його використання в різних галузях промисловості [10].

Враховуючи першу підвибірку, проведемо аналіз регресії, визначимо параметри рівняння за допомогою методу найменших квадратів.

Система рівнянь

$$a_0n + a_1\sum x = \sum y, \quad (2)$$

$$a_0\sum x + a_1\sum x^2 = \sum y \cdot x. \quad (3)$$

Для наших даних система рівнянь має вигляд

$$18a_0 + -14000a_1 = 3958.41, \quad (4)$$

$$-13001a_0 + 11000001a_1 = -3227211. \quad (5)$$

З першого рівняння висловлюємо a_0 і підставимо в друге рівняння. Матриця експерименту зведена в табл. 2.

Існує кілька способів графічного відображення автокореляції, і один з них асоціює відхилення ε_i з моментами їхнього отримання, тобто із зазначеними часовими моментами або порядковими номерами спостережень. На графіку по осі абсцис може бути відображений час отримання статистичних даних або порядковий номер спостереження, а по осі ординат – величини відхилень ε_i або їхні оцінки.

Матриця експерименту

x	y	x ²	y ²	x • y	y(x)	(y-y(x)) ²
-1000	12.86	1000000	165.41	-12864	272.55	70059.98
-1000	24.99	1000000	624.1	-23994	273.55	63787.79
-1000	46.37	1000000	2150.21	-46373	274.52	53444.96
-1000	82.64	1000000	6830.01	-82642	275.55	37989.4
-1000	142.17	1000000	20212.01	-142161	276.55	18328.18
-1000	237.15	1000000	56238.21	-237141	277.51	1532.18

Логічно вважати, що наявність зв'язку між відхиленнями свідчить про наявність автокореляції. Відсутність такого зв'язку, ймовірно, вказує на відсутність автокореляції.

Коефіцієнти автокореляції випадкових даних повинні мати вибірковий розподіл, що наближається до нормального з нульовим математичним очікуванням і середнім квадратичним відхиленням, яке дорівнює

$$S_{eY} = \frac{1}{\sqrt{45}} = 0.149. \quad (6)$$

На початковому етапі статистичного аналізу рівняння регресії зазвичай проводять перевірку однієї важливої передумови – умови статистичної незалежності відхилень між собою. Ця перевірка включає оцінювання некорельованості сусідніх величин e_i .

Для більш повного дослідження взаємодії цих величин з $y-y(x)$ та іншими необхідними факторами побудовано інші матриці кореляції сусідніх величин e_i . Це дає змогу отримати об'єктивну картину взаємодії змінних і коефіцієнтів, а також інших даних.

Зазначимо, що зниження концентрації нафталіну в газі під час абсорбції в скрубєрі насадкового типу при температурах 41-82 °С може досягати 55 %.

Прогнозується, що при менших температурах охолодження газу це зниження буде менш помітним через дифузійні обмеження, пов'язані із збільшенням в'язкості абсорбенту (кам'яновугільна смола).

Важливо враховувати, що не кожен фактор у моделі може суттєво збільшити пояснювану варіацію результативної ознаки, що може бути пов'язано зі взаємозалежністю факторів. Оцінювання необхідне для визначення значущості впливу кожного фактора.

У дифузійних умовах первинних газових холодильників взаємодія абсорбції і сублімаційної конденсації нафталіну з коксового газу залежить від температури, рівноважного розподілу в системі смола-нафталін, умов контакту, кількості, в'язкості і поверхні абсорбенту. Зокрема, найбільший ефект очищення спостерігається при максимальному вмісті крапель смоли, зважених в охолодженному газі, за рівних температурах охолодження газу.

Для більш глибокого аналізу процесу очищення відхідних газів від ливарного виробництва слід розглянути можливість використання низьких температур для контролю вмісту нафталіну. Це краще проявляється при побудові графіків регресії для різних значень і параметрів (рис. 2).

Подано графіки, які відображують зв'язок між температурою та тиском і вмістом парів нафталіну (рис. 3).

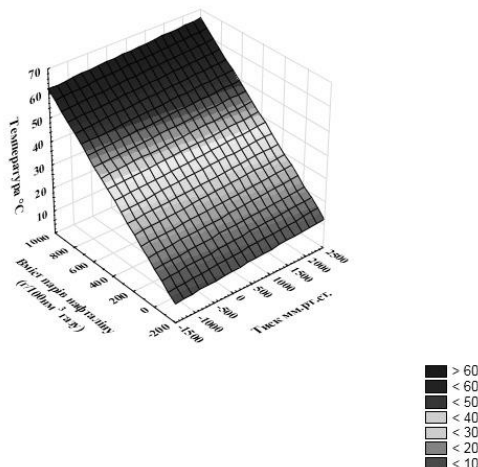


Рис. 2. Регресія залежності вмісту нафталіну в коксовому газі від температури і тиску

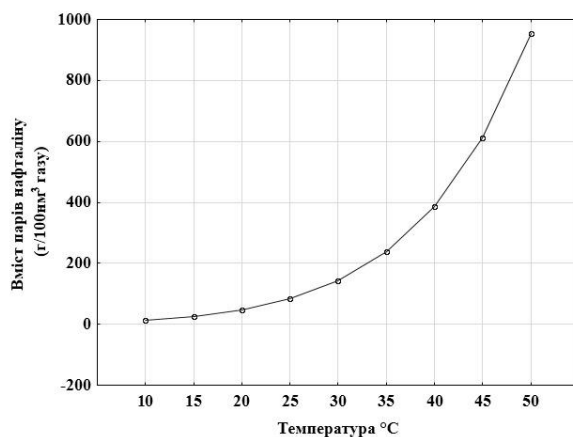


Рис. 3. Графік залежності вмісту парів нафталіну в коксовому газі від температури

Висновки. Дослідження та аналіз взаємозв'язку між температурою і тиском у коксовому газі та вмістом нафталіну вказують на можливості розроблення та оптимізації методів зниження присутності цього ароматичного вуглеводня. Мета роботи була поставлена в контексті актуальних проблем у галузі екології та виробництва, а результати спрямовані на досягнення високої ефективності очищення коксового газу від нафталіну.

Дослідження спрямоване на вивчення оптимальних параметрів для мокрого газоочищення та використання скрубєрів насадкового типу; аналіз наукових досягнень у цій галузі та розгляд передових

методів, які могли б забезпечити ефективне вилучення нафталіну з коксового газу.

Однією з ключових цілей роботи було розглядання можливостей впровадження отриманих результатів для покращення ефективності та сталості технологічних процесів у промисловості. Це може значно сприяти сталому розвитку та збереженню природи, адаптуючи промисловість до сучасних екологічних вимог і викликів.

Загалом дослідження відкриває перспективні напрями для подальших розробок у галузі очищення коксового газу, сприяючи прогресу та вдосконаленню технологій для досягнення високого ступеня екологічної чистоти у виробництві.

Список використаних джерел

1. Celik S., Drewnick F., Fachinger F., Brooks J., Darbyshire E., Coe H., et al. Influence of Vessel Characteristics and Atmospheric Processes on the Gas and Particle Phase of Ship Emission Plumes. In Situ Measurements in the Mediterranean Sea and around the Arabian Peninsula. *Atmospheric Chem Phys*, 20 (8) (2020), 10.5194/acp-20-4713-2020). Pp. 4713-4734.
2. Wang Z. Energy and Air Pollution. In *Comprehensive Energy Systems*; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2018; Vol. 1–5. P. 909–49.
3. Endres S., Maes F., Hopkins F., Houghton K., Mårtensson E.M., Oeffner J., et al. A New Perspective at the Ship-Air-Sea-Interface: The Environmental Impacts of Exhaust Gas Scrubber Discharge. *Front Mar Sci*, 5 (2018), 10.3389/fmars.2018.00139.
4. Olenius T., Yli-Juuti T., Elm J., Kontkanen J., Riipinen I. New Particle Formation and Growth: Creating a New Atmospheric Phase Interface. In *Physical Chemistry of Gas–Liquid Interfaces*; *Developments in Physical & Theoretical Chemistry*; Elsevier; 2018. P. 315–52.
5. Liu L., Li H., Zhang H., Zhong J., Bai Y., Ge M., et al. The Role of Nitric Acid in Atmospheric New Particle Formation. *Phys Chem Chem Phys*, 20 (25) (2018). Pp. 17406-17414, 10.1039/C8CP02719F.
6. Elm J. An Atmospheric Cluster Database Consisting of Sulfuric Acid, Bases, Organics, and Water. *ACS Omega*, 4 (6) (2019). Pp. 10965-10974, 10.1021/acsomega.9b00860.
7. Carlsson P.T.M., Celik S., Becker D., Olenius T., Elm J., Zeuch T. Neutral Sulfuric Acid-Water Clustering Rates: Bridging the Gap between Molecular Simulation and Experiment. *J Phys Chem Lett*, 11 (2020). Pp. 4239-4244, 10.1021/acs.jpcclett.0c01045.
8. Kheirnik M. et al. Revamping of an acid gas absorption unit: an industrial case study J. *Nat. Gas Sci. Eng.* (2018).
9. Wei Li, Shichang Li, Zhuolun Li, Xinsheng Wang, Yan Zhu. Self-circulating particle jet drilling tool design and simulation based on venturi effect. *Special Oil Gas Reservoirs*, 25 (2) (2018). Pp. 154-158.
10. Jing Ma, Hao Feng, Yongtu Liang, Tiantian Lei, Ning Xu, Haoran Zhang Feasibility study on unblocking submarine pipeline with the coiled tubing and the high-pressure water jet. *China Pet Mach*, 45 (6) (2017). Pp. 103-107.

Бурда Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, асистент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua. ORCID ID: orcid.org/0000-0003-3470-1334.

Півненко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, асистент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail yurii.pivnenko@kname.edu.ua. ORCID ID: orcid.org/0000-0002-6675-2649.

Череднік Артем Димитрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: Artem.Cherednik@kname.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3385-0584>.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри ТТДЕМ, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: ihorredko1972@gmail.com. ORCID ID <https://orcid.org/0009-0005-1556-0830>.

Логвіненко Олександр Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри механіки і проектування машин, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: logvinenko.mpm@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-5731-7995.

Yurii Burda, Ph.D., Assistant Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O.M. Beketov. E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua.

ORCID ID: 0000-0003-3470-1334.

Yurii Pivnenko, Ph.D., Assistant Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O.M. Beketov. E-mail: yurii.pivnenko@kname.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-6675-2649.

Artem Cherednik, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O.M. Beketov. E-mail: Artem.Cherednik@kname.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-3385-0584.

Ihor Redko, D.Sc. (Doctor of Technical Sciences), Professor at the Department of Transport Technology, Design and Exploitation of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ihorredko1972@gmail.com. ORCID ID: 0009-0005-1556-0830.

Lohvinenko Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics and Machine Design, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-5731-7995. E-mail: logvinenko.mpm@gmail.com

Статтю прийнято 29.01.2024 р.

УДК 620.9,666.9-13

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПІДЗЕМНОГО КОЛЕКТОРА ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Доктори техн. наук А. О. Редько, О. Ф. Редько, канд. техн. наук А. О. Каграманян, аспіранти М. М. Батюта, Д. І. Краснопольський

PREDICTION OF THE TEMPERATURE REGIME OF AN UNDERGROUND COLLECTOR IN A GEOTHERMAL CIRCULATION-BASED HEATING SYSTEM

Dr. Sc. (Tech.) A. Redko, Dr. Sc. (Tech.) O. Redko, PhD (Tech.) A. Kagramanian, postgraduate student M. Batiuta, postgraduate student D. Krasnopolskyi

Анотація. Наведено результати чисельного дослідження температурного режиму пласта геотермального родовища. Розроблено математичну модель процесу теплообміну геотермальної рідини та гірської породи. Модель руху геотермальної рідини складає систему рівнянь нерозривності, кількості руху та енергії. Охолодження пласта визначається положенням фронту охолодження, який визначається ізотермою з температурою 288 К. Рішення одержано методом комп'ютерного моделювання. Показано значний вплив дебіту свердловин. При дебіті 10 м³/год у період експлуатації 7500 год прогнозується зниження температури геотермальної рідини від 347 до 338 К, зі збільшенням дебіту до 100 м³/год можливе зниження температури від 347 до 325 К.

Ключові слова: температурний режим, геотермальне родовище, теплообмін, свердловина, дебіт, пласт, математична модель, комп'ютерне моделювання.

Annotation. The results of a numerical study of the temperature regime of a geothermal field formation are presented. A mathematical model of the heat exchange process between geothermal fluid and rock has been developed. The model of geothermal fluid movement consists of a system of continuity, momentum, and energy equations. At the beginning of computer modeling, the geometry, system parameters, as well as initial and boundary conditions are defined. Water injection technology maintains reservoir pressure and high flow rates, but leads to a decrease in temperature in the aquifer. Reducing the temperature of the geothermal fluid is a crucial issue for long-term operation,

the prediction of which is possible with the help of computer modeling. The cooling of the formation is determined by the position of the cooling front, which is defined by an isotherm with a temperature of 288 K. The solution has been obtained by computer modeling. It has been shown that the displacement of the formation cooling front is determined by the thermophysical properties of the rock formations, filtration rate, physical properties of the geothermal fluid, and the temperature of the geothermal fluid supplied to the injection well. The relationship governing the displacement of the formation cooling front has been obtained. The cooling of the formation depends on the distance between the production and injection wells of geothermal fluid and the pressure drop in the formation. The significant influence of the flow rate of the wells has been shown. With a flow rate of 10 m³/h over an operating period of 7500 hours, the temperature of the geothermal fluid is predicted to decrease from 347 K to 338 K; with an increase in flow rate to 100 m³/h, a decrease in temperature from 347 K to 325 K is possible. It has been shown that the cooling of the formation mainly occurs in the horizontal plane. Comparison of obtained numerical data with known literature has been performed. Extending the operational lifespan is possible through the implementation of the periodic short-term operation-stop technology (a 10-year cycle, totaling 100 years). This technology allows for greater heat extraction compared to longer-term operation (a 50-year cycle, totaling 100 years). Additionally, increasing the distance between production and injection wells to 1000-1500 meters reduces cooling rates and prolongs the lifespan of the geothermal system. When forecasting the temperature regime of geothermal reservoirs, it is necessary to monitor and refine mathematical models with operational and well research data.

Key words: *temperature regime, geothermal field, heat exchange, well, flow rate, reservoir, mathematical model, computer modeling.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції освоєння геотермальних ресурсів аналізуються в роботах [1-5]. Основні напрями пов'язані зі створенням поліпшених геотермальних систем, забезпеченням стійкого режиму роботи свердловин за різних параметрів експлуатації, удосконаленням методів прогнозування температурного режиму пласта при тривалій експлуатації.

В умовах тривалої експлуатації температура видобутої води знижується. Зі збільшенням дебіту свердловин темп зниження температури геотермальної води також збільшується, що призводить до зменшення ефективності системи теплопостачання.

При проєктуванні системи геотермального теплопостачання та розробки геотермального родовища необхідно ретельне прогнозування зміни температурного режиму експлуатаційних свердловин і кількості теплової енергії, що видобувається, протягом тривалого періоду (близько 30 років) і більше.

При проєктуванні систем геотермального теплопостачання широке застосування знаходять циркулюючі системи, що містять одну або кілька експлуатаційних свердловин, нагнітальну свердловину, теплообмінне обладнання для передавання теплоти геотермальної рідини в систему теплопостачання.

Відома методика визначення граничного часу розробки геотермального родовища, що дає змогу визначити вплив таких параметрів: перепад тиску в пласті; відстані між експлуатаційною та нагнітальною свердловинами; теплофізичні характеристики гірської породи та геотермальної рідини (сольового розчину). Однак при експлуатації системи теплопостачання необхідно забезпечити потрібну кількість теплоти, що визначається як дебітом свердловини, так і температурою геотермальної рідини, яка в процесі експлуатації знижується. Значення характеру залежності зміни температури геотермальної рідини в часі дає змогу

забезпечувати процес керування розробкою геотермального родовища.

Вибір технічних і технологічних рішень при складанні геолого-економічних і техніко-економічних обґрунтувань для проектування системи геотермального теплопостачання багато в чому визначається як капітальними витратами, так і геологічними та гідрологічними параметрами, складом геотермальної рідини. Тому обґрунтована методика прогнозування температурного режиму дасть змогу приймати оптимальні рішення на стадії проектування та експлуатації системи теплопостачання [6–10].

Відомі методики прогнозування температурного режиму ГЦС не враховують впливу багатьох факторів. Наводиться залежність зміни геотермальної води в часі:

$$\frac{dT(\tau)}{d\tau} = -\frac{q(\tau)}{V_{nl}}(T(\tau) - T_{T.B}^X). \quad (1)$$

Зміна температури геотермальної рідини визначається дебітом свердловини, температурою охолодженої рідини та об'ємом пласта. Не враховуються гідрогеологічні тепло-масообмінні параметри, що впливають на зміну температури рідини при неізотермічній фільтрації в пласті, а також інші фактори. Тому надійність прогнозування зміни температури рідини з використанням залежності (1) недостатньо висока.

Зважаючи на те, що в ГЦС у пласт нагнітається охолоджена термальна рідина,

одним із важливих завдань дослідження температурного поля геотермального колектора є визначення руху фронту теплоти.

У роботі переміщення фронту температур описується формулою

$$X_T = \frac{c}{c_e} v \tau, \quad (2)$$

де відношення c/c_e показує, у скільки фронт температур випереджає рух зазначених частинок, швидкість яких дорівнює швидкості фільтрації.

Оскільки зі зміною температури змінюється в'язкість рідини, відповідно і гідравлічний опір руху, швидкість фільтрації будуть змінними і визначатися положенням фронту тепла:

$$v = \frac{k\Delta P}{\mu_1 X_T + \mu_0(L - X_T)}, \quad (3)$$

де ΔP – перепад тиску, Па;

μ_0, μ_1 – динамічна в'язкість геотермальної води до та після проходження фронту температур, Па·с;

L – довжина пласта (відстань між видобувною та нагнітальною свердловинами), м;

X_T – положення фронту тепла.

З рівнянь (2) і (3) закон руху фронту температур у диференціальній формі має вигляд

$$[\mu_1 X_T + \mu_0(L - X_T)] dX_T = \frac{c}{c_e} k\Delta P d\tau. \quad (4)$$

Інтегруючи, можна отримати закон руху фронту тепла:

$$\frac{X_T}{L} + \frac{\mu_1 - \mu_0}{2\mu_0} \left(\frac{X_T}{L}\right)^2 = \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (5)$$

де $\tau_0 = \frac{c_e \mu_0 L^2}{ck\Delta P}$ – час вироблення пласта, у якому $\mu_1 = \mu_0$.

При нагнітанні охолодженої термальності води в пласт його охолодження відбувається з більшою швидкістю, ніж швидкість фільтрації.

Прийнявши відстань L рівною відстані між видобувною та нагнітальною свердловинами, $X_T = L$, можна знайти час τ_1 , за який фронт тепла X_T досягне видобуткової свердловини:

$$\frac{\tau_1}{\tau_0} = \frac{\mu_1 + \mu_0}{2\mu_0}. \quad (6)$$

Теплообмін водоносного пласта з навколишніми гірськими породами при

$$c_n \rho_n \frac{\partial t}{\partial \tau} + c \rho \left(v_x \frac{\partial t}{\partial x} + v_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{2\lambda_n}{h} \frac{\partial t}{\partial z}, \quad z=0, \quad (9)$$

де c_n , ρ_n , λ_n – відповідно теплоємність, щільність і теплопровідність гірських порід.

При $h \gg 2a\sqrt{\tau}$ теплообміном пласта з гірськими породами можна знехтувати.

Для визначення оптимальної відстані, m , в інженерних розрахунках між видобутковою та нагнітальною свердловинами використовується формула

$$L = \sqrt{\frac{\tau}{fB(A+1)}}, \quad (10)$$

де τ – тривалість роботи ГЦС, год;
 f – коефіцієнт нерівномірності;

$$A = \frac{(1-m)c_e \rho_e}{mc};$$

$$B = \frac{\pi h_p m}{3Q},$$

нагнітанні холодної води слід урахувати, якщо

$$h < 2a\sqrt{\tau}, \quad (7)$$

де a – температуропровідність навколишніх гірських порід.

У цьому випадку температурне поле гірської породи описується рівнянням

$$c_n \rho_n \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_n \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad z > 0 \quad (8)$$

за граничної умови перенесення теплоти по пласту

h_p – розрахункова потужність водоносного пласта;

Q – витрати теплоносія, м³/год.

Метою роботи є прогнозування температурного режиму геотермальної системи циркуляції залежно від витрат рідини.

Основні результати. За дворівневою моделлю характеру руху геотермального теплоносія О. Л. Артем'євої, процеси тепломасоперенесення в геотермальному колекторі при одній видобувній та одній нагнітальній свердловині описуються такими рівняннями нерозривності, кількості руху та енергії:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (11)$$

$$v_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (12)$$

$$v_y = -\frac{k}{\mu} \left[\frac{\partial P_e}{\partial y} - \rho \beta g (t - T_{ni}) \sin \varphi \right], \quad (13)$$

$$c_e \rho_e \frac{\partial t}{\partial \tau} + c \rho v_x + c \rho v_y \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \gamma. \quad (14)$$

Розв'язання рівнянь (11)–(14) за певних граничних і початкових умов дає можливість спрогнозувати розвиток процесів тепломасоперенесення в геотермальному колекторі, які визначають ефективний термін експлуатації геотермальної системи теплопостачання, визначити оптимальну відстань між добувною та нагнітальною свердловинами.

Отримано чисельні результати моделювання фільтраційної течії та теплообміну геотермальної рідини в пористому водоносному шарі. Сполучене тривимірне завдання гідродинаміки, теплообміну та фільтрації розв'язувалося за допомогою прикладного програмного пакета Phoenix. Нижче наведено основні чисельні результати. Розрахунки виконані за таких умов: відстань між свердловинами 400 м; товщина водоносного шару – 30 м; температура геотермальної рідини – 74 °C (3467 K); температура охолодженої рідини, що закачується в пласт, – 15 °C (288 K). Характеристика гірського масиву: щільність – 2500 кг/м³; теплоємність – 905 кДж/(кг·K); теплопровідність – 2,5 Вт/(м·K); розмір частинок – 1·10⁻³ м; пористість – 0,32. Зміну температурного шару в часі залежно від дебіту геотермальної води показано на рис. 1.

Зміну температури геотермальної рідини на гирлі експлуатаційної свердловини показано на рис. 2.

На рис. 3 показано розподіл температури в гірському масиві у вертикальній і горизонтальній площинах.

Висновки. Результати виконаних чисельних досліджень вказують на суттєвий вплив дебіту в експлуатаційній свердловині на зміну температури геотермальної рідини, що видобувається. Цей фактор необхідно враховувати при проектуванні геотермальних циркуляційних систем теплопостачання.

Визначено, що зміна температури в гірському масиві спостерігається на відстані 400 м від свердловини; зниження температури в гірському масиві водоносного шару з коефіцієнтом пористості 0,32 у горизонтальній площині від 350 до 290 K, а у вертикальній площині від 328 до 290 K, при цьому зміна температури в горизонтальній площині за розміром (120 м) перевищує зміни температури у вертикальній площині (20 м), що зумовлено різними напрямками потоків фільтрації геотермальної рідини у водоносному пласті; температура геотермальної рідини починає знижуватися після 400 год першого року експлуатації, при цьому темп зниження температури складає 25/300 K/год за дебіту 100 м³/год. При дебіті 10 м³/год темп зниження температури складає 25/3000 K/год.

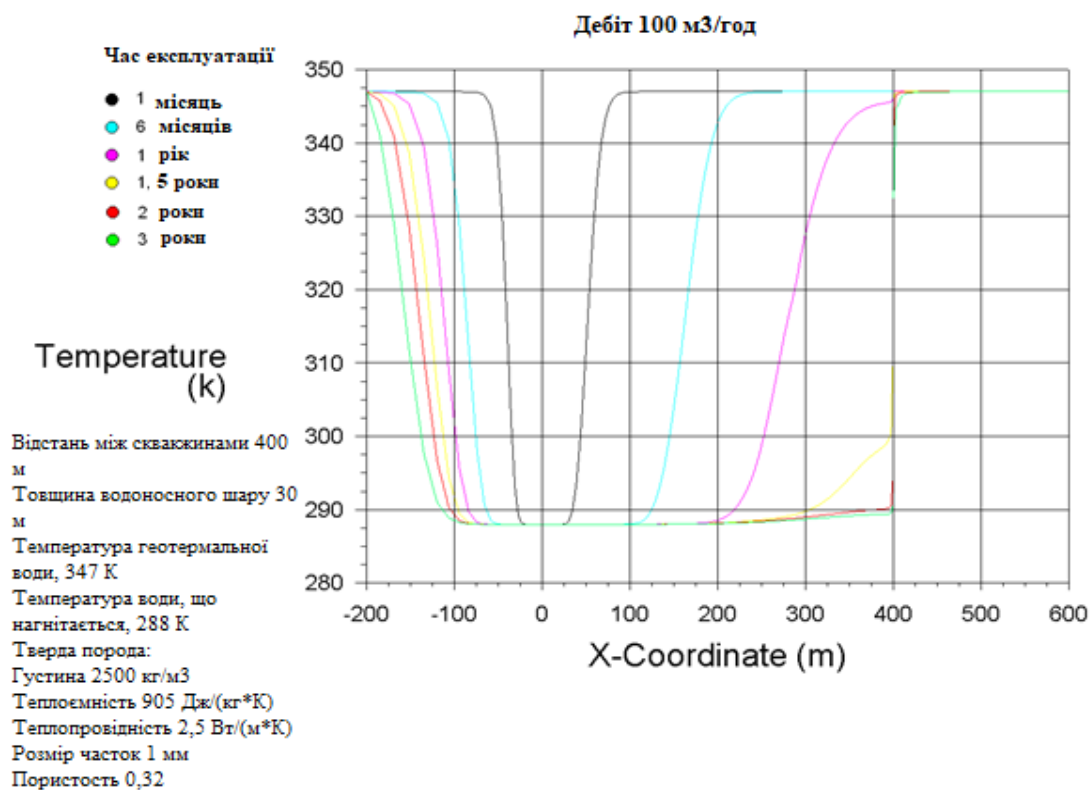
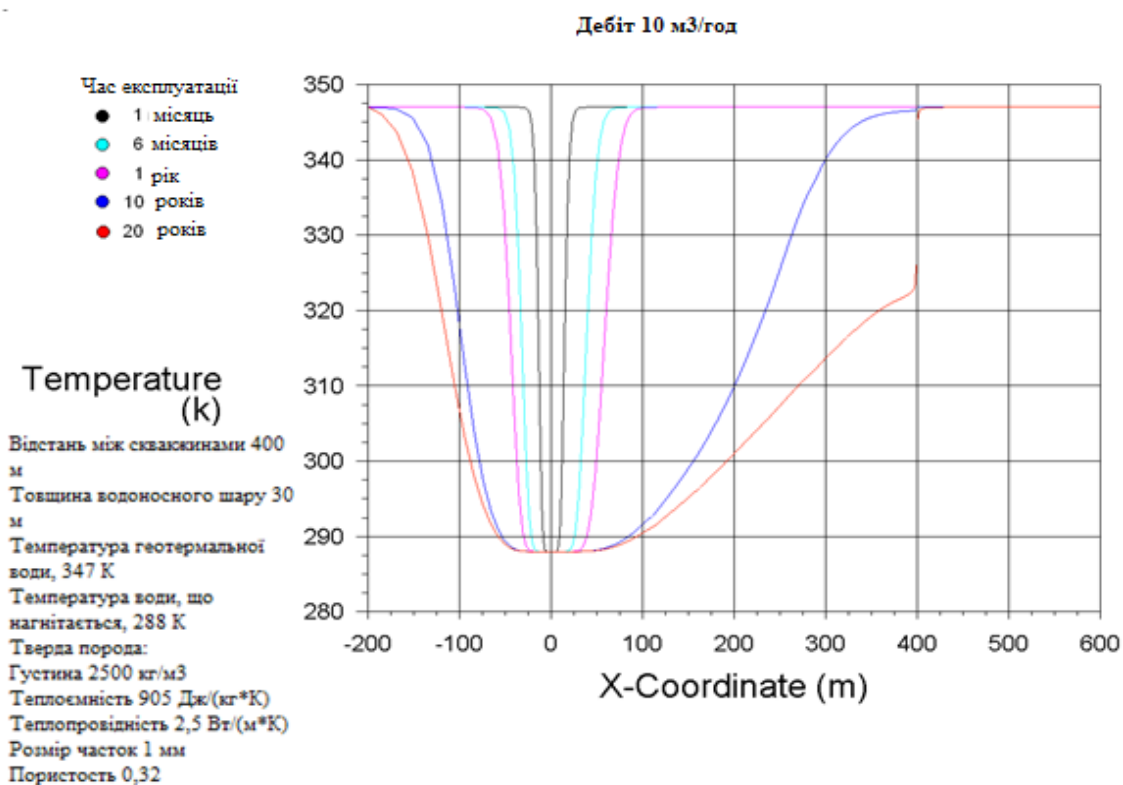


Рис. 1. Зміна температури водоносного шару вздовж відстані між свердловинами під час експлуатації з різними дебітами

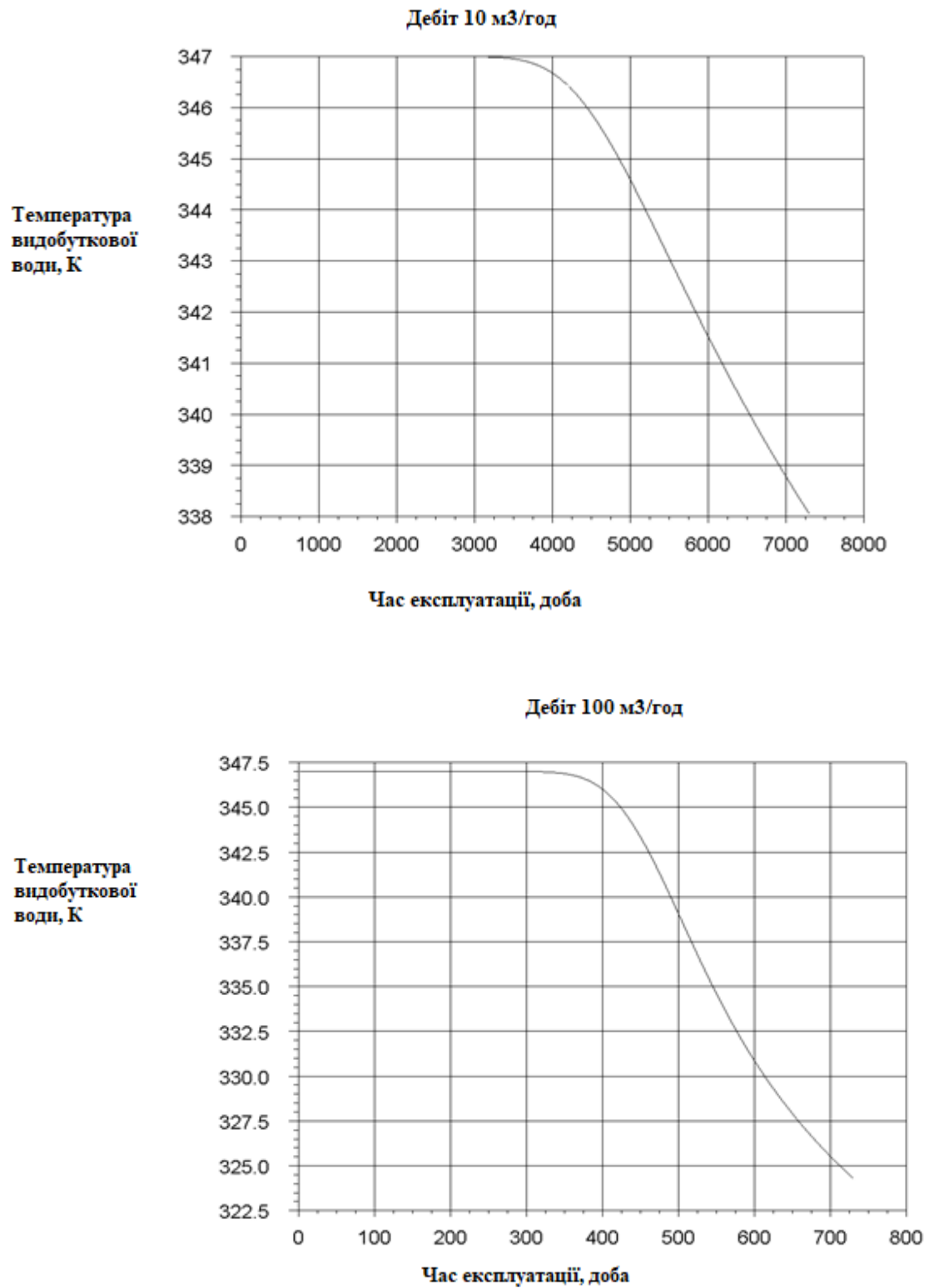


Рис. 2. Зміна температури видобутку від часу експлуатації з різними дебітами

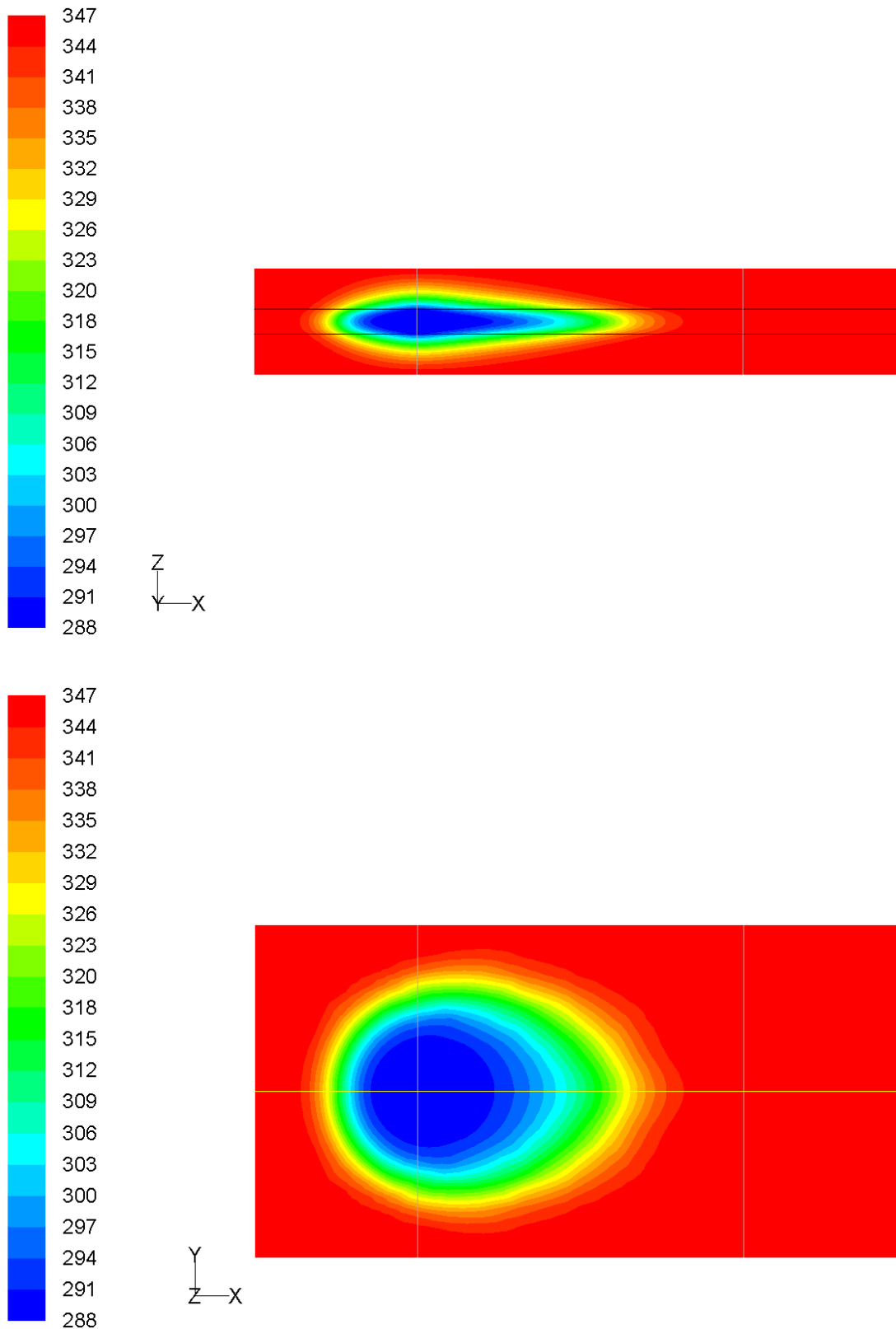


Рис. 3. Розподіл температури в гірському масиві через 10 років експлуатації з дебітом 10 м³/год: а – у вертикальній площині, що проходить через осі свердловин; б – горизонтальній площині, що проходить посередині висоти водоносного шару

Список використаних джерел

1. Shulyupin A. Steam-water flow instability in geothermal wells. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 105. 290-295.
2. Zhang J. et al. (2019). Numerical evaluation of heat extraction for EGS with tree-shaped wells. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 134. 286-310.
3. Rizaldy, Zarronk S. J. (2016). Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines. *Proc. 38 th New Zealand Geothermal Workshop, New Zealand*. URL: <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/32474>.
4. Norbeck J. H. et al. (2018). Field observations at the Fenton Hill enhanced geothermal system test site support mixed-mechanism simulation. *Geothermics*. 74. 135-149.
5. Shulyupin A. (2019). Methods for ensuring of stable operate of steam-water wells. *Georesursy-Georesources*. 21(1). 99-106.
6. General bibliographic reference. *Proc. Stanford Workshops on Geothermal Reservoir Engineering*. Vol. 1-30. 1975-2005. Stanford University, Stanford, CA.
7. Samaniego V. Cinco-Ley F. and H. Reservoir Engineering Concepts. Chap. 9 in *Handbook of Geothermal Energy*, Edwards, L. M., G. V. Chilingar, H. H. Rieke III and W. H. Fertl, Eds., Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1982.
8. Golan M., Whitson C.H. *Well Performance*. 2nd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
9. Ryley D. J. Analysis of the Flow in the Reservoir-Well System. Sect. 2.6 in *Sourcebook on the Production of Electricity from Geothermal Energy*, Kestin J., Ed. In Chief, DiPippo R., Khalifa H. E., Ryley D. J., Eds., U.S. Dept. of Energy, DOE/RA/4051-1, U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, 1980.
10. Matthews C. S., Russell D. G. *Pressure Build up and Flow Tests in Wells*. Society of Petroleum Engineers, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, 1967.

Редько Андрій Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри архітектури та інженерних вишукувань, Сумський національний аграрний університет. Тел.: 0504240404. E-mail: andrey.ua-mail@ukr.net. ORCID iD: 0009-0003-2883-5624.

Редько Олександр Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції, Харківський національний університет міського господарства. Тел.: 0504002262. E-mail: Redko.af@gmail.com. ORCID iD: 0009-0007-9701-3324.

Каграманян Артур Олександрович, кандидат технічних наук, проректор, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: 0577301005. E-mail: kartal2@ukr.net. ORCID iD: 0000-0003-3520-4911.

Батюта Максим Миколайович, аспірант кафедри теплогазопостачання та вентиляції, Харківський національний університет міського господарства. Тел.: 0671744142. E-mail: maxico69@gmail.com. ORCID iD: 0009-0009-5837-6063.

Краснопольський Денис Ігорович, аспірант кафедри теплогазопостачання та вентиляції, Харківський національний університет міського господарства. Тел.: 0953699994. E-mail: den4ik1703@ukr.net. ORCID iD: 0009-0005-8545-5534.

Andriy Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Engineering Research, Sumy National Agrarian University. Tel.: 0504240404. E-mail: andrey.ua-mail@ukr.net. ORCID iD: 0009-0003-2883-5624.

Oleksandr Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heating, Gas Supply and Ventilation, Kharkiv National University of Urban Economy. Tel.: 0504002262. E-mail: Redko.af@gmail.com. ORCID iD: 0009-0007-9701-3324.

Artur Kahramanyan, candidate of technical sciences, associate professor, vice-rector of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 0577301005. E-mail: kartal2@ukr.net. ORCID iD: 0000-0003-3520-4911.

Maksym Batyuta, postgraduate student of the Department of Heating, Gas Supply and Ventilation, Kharkiv National University of Urban Economy. Tel.: 0671744142. E-mail: maxico69@gmail.com. ORCID iD: 0009-0009-5837-6063.
Krasnopolsky Denis, postgraduate student of the Department of Heating, Gas Supply and Ventilation, Kharkiv National University of Urban Economy. Tel.: 0953699994. E-mail: den4ik1703@ukr.net. ORCID iD: 0009-0005-8545-5534.

Статтю прийнято 04.03.2024 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 539.375

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБІЖНОСТІ ПОЛІНОМІВ І МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ
З УРАХУВАННЯМ ПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ**

Кандидати техн. наук В. П. Андрієвський, І. Ю. Мартинюк,
асп. О. В. Максим'юк

**STUDY OF THE CONVERGENCE OF POLYNOMIALS AND THE FINITE ELEMENT
METHOD TAKING INTO ACCOUNT THE PLASTIC PROPERTIES OF THE MATERIAL**

PhD (Tech.) V. Andriievskiy, PhD (Tech.) I. Martyniuk,
postgraduate student O. Maksymiuk

***Анотація.** У статті наведено розв'язувальні співвідношення для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості скінченного елемента зі змінними механічними і геометричними параметрами та з урахуванням пластичних властивостей матеріалу. Проведено дослідження збіжності результатів розрахунку напіваналітичним методом скінчених елементів (НМСЕ) при застосуванні рядів Фур'є та поліномів і результатів, отриманих методом скінчених елементів (МСЕ) з урахуванням пластичних властивостей матеріалу на тестовому прикладі (досліджено напружено-деформований стан нескінченної смуги прямокутного перерізу, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням).*

***Ключові слова:** скінченний елемент, напіваналітичний метод скінчених елементів, ряди Фур'є, поліноми, пластичність.*

***Abstract.** One of the challenges associated with the development of numerical methods for structural analysis based on the finite element method is justifying the reliability of the obtained results and comparing the effectiveness of new approaches with existing ones. Theoretically, this is often difficult to accomplish, even for specific cases. Therefore, to address these issues, numerical experiment data obtained on benchmark problems are usually employed. This article explores a class of objects representable by a prismatic finite element with a cross-section of arbitrary shape. For this prismatic finite element with variable mechanical and geometric parameters across the section, the solution relationships of the semi-analytical finite element method are presented for calculating nodal reactions and stiffness matrix coefficients, considering the material's plastic properties. The convergence of calculation results based on the semi-analytical finite element method using Fourier series and polynomials is compared with the results obtained using the finite element method (FEM) considering the material's plastic properties. This comparison is conducted on a test problem involving the stress-strain state of an infinitely long strip with a rectangular cross-section subjected to uniformly distributed loading. The FEM solution for this problem is used as a reference result. The calculations are performed with a fixed number of finite elements across the thickness of the cross-section, as the study establishes that further increasing their number has a negligible impact on the calculation results. The obtained calculation results allow concluding about the equal convergence rate of polynomials and Fourier series in the considered problem. At the same time, it is worth noting*

the significant advantage of the semi-analytical finite element method compared to the conventional finite element method. This is because maintaining only five terms in the series expansion ensures solving the problem with the same accuracy as using a nine-node mesh in the grid domain.

Keywords: *finite element, semi-analytical finite element method, Fourier series, polynomials, plasticity.*

Вступ. Однією з ключових проблем, пов'язаних із розробленням чисельних методів для аналізу конструкцій на основі методу скінченних елементів (МСЕ), є встановлення достовірності отриманих результатів і порівняння ефективності нових підходів з уже відомими методами. Теоретично це завдання не завжди є простим і часто вирішується за допомогою числових експериментів на контрольних задачах. У статті порівняно ефективність застосування скінченних елементів зі змінними механічними і геометричними параметрами та з урахуванням пластичних властивостей матеріалу за допомогою розв'язання контрольної задачі. Також досліджено збіжність результатів при використанні рядів Фур'є, поліномів і методу скінченних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження напружено-деформованого стану складних просторових конструкцій зі змінними механічними і геометричними параметрами під дією різних навантажень є можливим лише з застосуванням чисельних методів, зокрема МСЕ та його ефективних модифікацій, до яких належить напіваналітичний метод скінченних елементів. На сьогодні досвід застосування НМСЕ поширений на велике коло задач механіки деформівного твердого тіла [1-3].

У роботах [4, 5] отримано розв'язувальні співвідношення та наведено алгоритм розв'язання просторових задач термов'язкопружнопластичності для неоднорідного косокутного СЕ, який дає змогу моделювати довільні граничні умови, і показано ефективність його застосування на тестових прикладах. У роботах [6, 7] подано розв'язувальні співвідношення та алгоритм розв'язання лінійних і нелінійних

рівнянь за методом блочних ітерацій напіваналітичним методом скінченних елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл. У роботі [8] для підтвердження достовірності одержуваних результатів на основі напіваналітичного методу скінченних елементів показано ефективність застосування цього підходу для розрахунку криволінійних неоднорідних призматичних об'єктів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є отримання розв'язувальних співвідношень для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості скінченного елемента зі змінними механічними і геометричними параметрами та з урахуванням пластичних властивостей матеріалу і порівняння ефективності їхнього застосування при дослідженні збіжності результатів розрахунку проведеного НМСЕ при застосуванні рядів Фур'є та поліномів і результатів, отриманих МСЕ.

Завданнями дослідження є таке:

- отримати розв'язувальні співвідношення для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості скінченного елемента зі змінними механічними і геометричними параметрами та з урахуванням пластичних властивостей матеріалу;
- дослідити збіжність результатів на контрольному прикладі при застосуванні рядів Фур'є, поліномів і МСЕ (дослідити напружено-деформований стан нескінченної смуги прямокутного перерізу, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням).

Основна частина дослідження.
Розв'язувальні співвідношення для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості скінченного

елемента зі змінними механічними і геометричними параметрами

Для апроксимації групи об'єктів використовуємо призматичний скінченний елемент із поперечним перерізом в обрисі чотирикутника довільної форми (рис. 1). Поміщаємо початок системи координат у центр елемента X^i , осі X^1 і X^2 направлені вздовж сторін чотирикутника, а вісь X^3 – вздовж нормалі до них. Вважаємо, що область, зайнята елементом, відображена в місцевій системі координат як паралелепіпед із поперечним перерізом одиничних розмірів і довжиною, рівною двом. Щодо розподілу по площі поперечного перерізу цього скінченного елемента механічних і геометричних параметрів нема жодних обмежень, і вони визначаються в певній кількості точок

інтегрування, розташованих у площині $X^3 = const$ (рис. 2). Також у цих точках інтегрування визначаються компоненти тензора напружень (рис. 3).

Задамо переміщення вздовж осі X^3 відрізками рядів Фур'є

$$U_{\alpha'} = \sum_{\ell=1}^L U_{\alpha'}^{\ell} \sin \frac{\ell \pi}{2} (X^3 + 1);$$

$$U_{3'} = \sum_{\ell=1}^L U_{3'}^{\ell} \cos \frac{\ell \pi}{2} (X^3 + 1) \quad (1)$$

і введемо білінійний закон розподілу переміщень у площині поперечного перерізу елемента:

$$U_n = \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} U_{n(S_1, S_2)} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} S_1 X^1 + \frac{1}{2} S_2 X^2 + S_1 S_2 X^1 X^2 \right), \quad (2)$$

де $U_{n(S_1, S_2)}$ – значення переміщень вузлів, подані як компоненти в базисній системі координат $Z^{n'}$ [9];

S_1 і S_2 – подвосні координати вузлів вздовж осей X^1 і X^2 , що визначають їхнє місцеположення в місцевій системі координат.

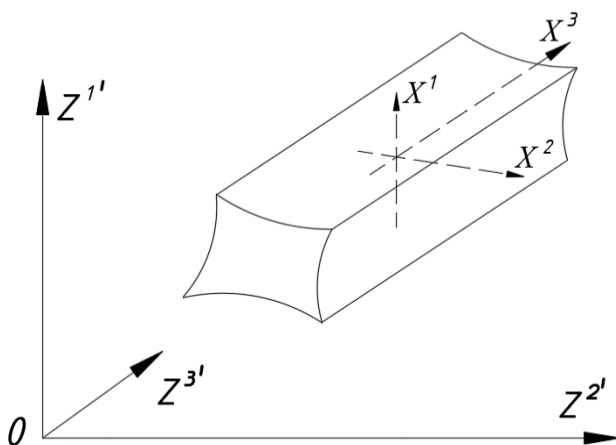


Рис. 1. Призматичний скінченний елемент

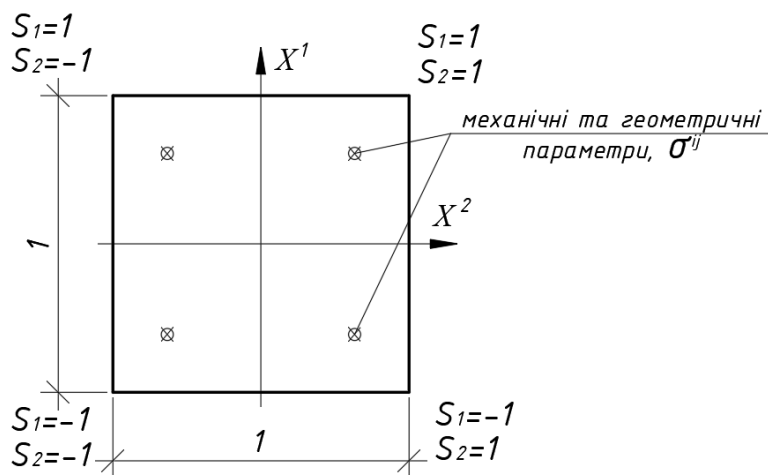


Рис. 2. Скінченний елемент, поданий у місцевій системі координат в осях X^1 і X^2

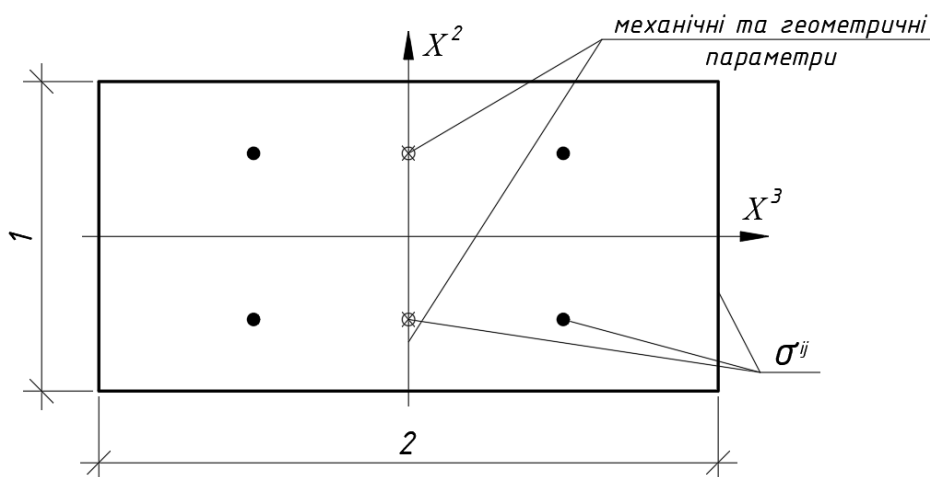


Рис. 3. Призматичний скінченний елемент у місцевій системі координат в осях X^2 і X^3

Для закону розподілу переміщень, який прийнято відповідно до методики моментної схеми скінченних елементів [10], використаємо подання деформацій відрізками ряду Маклорена

$$\varepsilon_{\alpha(\alpha)} = \varepsilon_{\alpha(\alpha)} + \varepsilon_{\alpha(\alpha),(3-\alpha)} X^{(3-\alpha)};$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{12};$$

$$\varepsilon_{\alpha 3} = \varepsilon_{\alpha 3} + \varepsilon_{\alpha 3,(3-\alpha)} X^{(3-\alpha)};$$

$$\varepsilon_{33} = \varepsilon_{33} + \varepsilon_{33,\alpha} X^\alpha,$$

де ε_{il} і $\varepsilon_{il,\alpha}$ – коефіцієнти розкладання деформацій у ряд Маклорена,

$$\varepsilon_{il} = \varepsilon_{il} \Big|_{x^\alpha=0}, \quad \varepsilon_{il,\alpha} = \frac{\partial \varepsilon_{il}}{\partial X^\alpha} \Big|_{x^\alpha=0}, \quad (\alpha \neq i, I).$$

Виразимо компоненти деформацій (3) у термінах переміщень:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\alpha(\alpha)} &= \overset{\circ}{Z}_{,\alpha}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',\alpha} + \left(\overset{\circ}{Z}_{,12}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',\alpha} + \overset{\circ}{Z}_{,\alpha}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',12} \right) X^{(3-\alpha)}; \\ \varepsilon_{12} &= \frac{1}{2} \left(\overset{\circ}{Z}_{,1}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',2} + \overset{\circ}{Z}_{,2}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',1} \right); \\ \varepsilon_{\alpha 3} &= \frac{1}{2} \left[\overset{\circ}{Z}_{,\alpha}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',3} + \overset{\circ}{Z}_{,3}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',\alpha} + \left(\overset{\circ}{Z}_{,12}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',3} + \overset{\circ}{Z}_{,\alpha}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',3(3-\alpha)} + \overset{\circ}{Z}_{,3}^{\gamma'} \overset{\circ}{U}_{\gamma',12} \right) X^{(3-\alpha)} \right]; \\ \varepsilon_{33} &= \overset{\circ}{Z}_{,3}^{\gamma'} \left(\overset{\circ}{U}_{\gamma',3} + \overset{\circ}{U}_{\gamma',3\alpha} X^\alpha \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де

$$\overset{\circ}{Z}_{,I}^i = Z_{,I}^i \Big|_{X^\alpha=0}, \quad \overset{\circ}{Z}_{,12}^{\gamma'} = \frac{\partial Z_{,1}^{\gamma'}}{\partial X^2} \Big|_{X^\alpha=0}; \quad (6)$$

$$\overset{\circ}{U}_{i,I} = U_{i,I} \Big|_{X^\alpha=0}, \quad \overset{\circ}{U}_{i,I^\alpha} = \frac{\partial U_{i,I}}{\partial X^\alpha} \Big|_{X^\alpha=0}. \quad (7)$$

Згідно з прийнятим законом розподілу переміщень (2) розрахуємо їхні похідні в центрі елемента (7):

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{U}_{i,\alpha} &= \frac{1}{2} \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} U_{i(S_1,S_2)} S_\alpha; \\ \overset{\circ}{U}_{i,3} &= \frac{1}{4} \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} U_{i(S_1,S_2),3}; \\ \overset{\circ}{U}_{i,12} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} U_{i(S_1,S_2)} S_1 S_2; \\ \overset{\circ}{U}_{i,3^\alpha} &= \frac{1}{2} \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} U_{i(S_1,S_2)} S_\alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

Записуємо компоненти тензора деформацій (5):

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{\alpha(\alpha)} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \frac{1}{2} \overset{\circ}{Z}_{,\alpha} \overset{\circ}{S}_{(\alpha)} + \left(\overset{\circ}{Z}_{,12} \overset{\circ}{S}_{\alpha} + 2 \overset{\circ}{Z}_{,\alpha} \overset{\circ}{S}_1 \overset{\circ}{S}_2 \right) X^{(3-\alpha)} \cdot U_{\gamma'(S_1, S_2)}; \\
 \varepsilon_{12} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \frac{1}{4} \left(\overset{\circ}{Z}_{,1} \overset{\circ}{S}_2 + \overset{\circ}{Z}_{,2} \overset{\circ}{S}_1 \right) U_{\gamma'(S_1, S_2)}; \\
 \varepsilon_{\alpha 3} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \left\{ \frac{1}{8} \left[\overset{\circ}{Z}_{,\alpha} + \left(\overset{\circ}{Z}_{,12} + 2 \overset{\circ}{Z}_{,\alpha} \overset{\circ}{S}_{(3-\alpha)} \right) X^{(3-\alpha)} \right] \cdot U_{\gamma'(S_1, S_2), 3} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} \overset{\circ}{Z}_{,3} \left(\overset{\circ}{S}_{\alpha} + 2 \overset{\circ}{S}_1 \overset{\circ}{S}_2 X^{3-\alpha} \right) U_{\beta'(S_1, S_2)} \right\}; \\
 \varepsilon_{33} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \frac{1}{4} \overset{\circ}{Z}_{,3} \left(1 + 2 \overset{\circ}{S}_{\alpha} X^{\alpha} \right) U_{\beta'(S_1, S_2), 3}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Використовуючи вирази для перемішень у вигляді рядів Фур'є (1) і, де це необхідно, проводячи диференціювання за X^3 , ми отримуємо

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{\alpha(\alpha)} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \sum_{\ell=1}^L \frac{1}{2} \left[\overset{\circ}{Z}_{,\alpha} \overset{\circ}{S}_{(\alpha)} + \left(\overset{\circ}{Z}_{,12} \overset{\circ}{S}_{\alpha} + 2 \overset{\circ}{Z}_{,\alpha} \overset{\circ}{S}_1 \overset{\circ}{S}_2 \right) X^{(3-\alpha)} \right] \cdot \sin \frac{\ell \pi (X^3 + 1)}{2} U_{\gamma'(S_1, S_2)}^{\ell}; \\
 \varepsilon_{12} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \sum_{\ell=1}^L \left(\overset{\circ}{Z}_{,1} \overset{\circ}{S}_2 + \overset{\circ}{Z}_{,2} \overset{\circ}{S}_1 \right) \sin \frac{\ell \pi (X^3 + 1)}{2} U_{\gamma'(S_1, S_2)}^{\ell}; \\
 \varepsilon_{\alpha 3} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \sum_{\ell=1}^L \left\{ \frac{\ell \pi}{16} \left[\overset{\circ}{Z}_{,\alpha} + \left(\overset{\circ}{Z}_{,12} + 2 \overset{\circ}{Z}_{,\alpha} \overset{\circ}{S}_{(3-\alpha)} \right) X^{(3-\alpha)} \right] U_{\gamma'(S_1, S_2)}^{\ell} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} \overset{\circ}{Z}_{,3} \left(\overset{\circ}{S}_{\alpha} + 2 \overset{\circ}{S}_1 \overset{\circ}{S}_2 X^{(3-\alpha)} \right) U_{\beta'(S_1, S_2)}^{\ell} \right\} \cos \frac{\ell \pi (X^3 + 1)}{2}; \\
 \varepsilon_{33} &= \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} \sum_{\ell=1}^L -\frac{\ell \pi}{8} \overset{\circ}{Z}_{,3} \left(1 + 2 \overset{\circ}{S}_{\alpha} X^{\alpha} \right) \sin \frac{\ell \pi (X^3 + 1)}{2} \cdot U_{\beta'(S_1, S_2)}^{\ell}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

У процесі отримання формул для обчислення вузлових реакцій і коефіцієнтів матриці жорсткості ми використовуємо

вихідне співвідношення виходячи з виразу для варіації енергії скінченного елемента

$$\delta\omega = \int_{x^1=-\frac{1}{2}}^{x^1=\frac{1}{2}} \int_{x^2=-\frac{1}{2}}^{x^2=\frac{1}{2}} \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \sigma^{ij} \delta\varepsilon_{ij} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3, \quad (11)$$

або форми матричних виразів

$$\delta\omega = \int_{x^1=-\frac{1}{2}}^{x^1=\frac{1}{2}} \int_{x^2=-\frac{1}{2}}^{x^2=\frac{1}{2}} \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \left(\delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3 \right), \quad (12)$$

де

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{33} \ 2\varepsilon_{12} \ 2\varepsilon_{13} \ 2\varepsilon_{23}\}; \quad (13)$$

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma^{11} \ \sigma^{22} \ \sigma^{33} \ \sigma^{12} \ \sigma^{13} \ \sigma^{23}\}.$$

Виразимо взаємозв'язок між деформаціями та коефіцієнтами розкладання переміщень у ряди Фур'є у такому вигляді:

$$\{\varepsilon\} = \sum_{\ell=1}^L \left([B_1]_{\ell} \sin \frac{\ell \pi (x^3 + 1)}{2} + [B_2]_{\ell} \cos \frac{\ell \pi (x^3 + 1)}{2} \{U\}_{\ell} \right), \quad (14)$$

де

$$[B_1]_{\ell} = \left[[B_1]_{\ell}^{(-1,-1)} [B_1]_{\ell}^{(+1,-1)} [B_1]_{\ell}^{(-1,+1)} [B_1]_{\ell}^{(+1,+1)} \right];$$

$$[B_2]_{\ell} = \left[[B_2]_{\ell}^{(-1,-1)} [B_2]_{\ell}^{(+1,-1)} [B_2]_{\ell}^{(-1,+1)} [B_2]_{\ell}^{(+1,+1)} \right]; \quad (15)$$

$$\{U\}_{\ell}^T = \left\{ \{U\}_{\ell(-1,-1)}^T \{U\}_{\ell(+1,-1)}^T \{U\}_{\ell(-1,+1)}^T \{U\}_{\ell(+1,+1)}^T \right\};$$

$$\{U\}_{\ell(S_1, S_2)}^T = \left\{ U_{1(S_1, S_2)}^T U_{2(S_1, S_2)}^T U_{3(S_1, S_2)}^T \right\}.$$

Елементи підматриць $[B_1]_{\ell}^{(S_1, S_2)}$ і $[B_2]_{\ell}^{(S_1, S_2)}$ визначаються за формулою (10) і подані в роботі [11].

Запишемо варіацію енергії, використовуючи коефіцієнти розкладання переміщень у ряди Фур'є та вузлові реакції призматичного скінченного елемента:

$$\delta\omega = \sum_{\ell=1}^L (\delta\{U\}_\ell^T) \{r\}_\ell, \quad (16)$$

де

$$\begin{aligned} \{r\}_\ell = & \int_{x^1=-\frac{1}{2}}^{x^1=\frac{1}{2}} \int_{x^2=-\frac{1}{2}}^{x^2=\frac{1}{2}} \left([B_1]_\ell^T \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \{\sigma\} \sin \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} dx^3 + \right. \\ & \left. + [B_2]_\ell^T \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \{\sigma\} \cos \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} dx^3 \right) \sqrt{g} dx^1 dx^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Провівши чисельне інтегрування, отримали вираз для розрахунку вузлових реакцій призматичного скінченного

елемента (CE1) зі змінними в перерізі $x^3 = const$ механічними і геометричними параметрами на основі напружень

$$\{r\}_\ell = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left[([B_1]_\ell^T \{\sigma_1\}_\ell + [B_2]_\ell^T \{\sigma_2\}_\ell) \sqrt{g} H_i H_j \right]_{(x_i^1, x_j^2)}, \quad (18)$$

де, за формулами гармонійного аналізу,

$$\begin{aligned} \{\sigma_1\}_\ell &= \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \left(\{\sigma\} \sin \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} \right)_m; \\ \{\sigma_2\}_\ell &= \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \left(\{\sigma\} \cos \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} \right)_m. \end{aligned} \quad (19)$$

У формулах I, J, M – кількість точок інтегрування за напрямками x^1, x^2, x^3 ; H_j – вагові функції; x_i^1, x_j^2 – координати точок інтегрування. Величини напружень $\{\sigma_1\}$ і $\{\sigma_2\}$ обчислюються в точках M , рівномірно розподілених по довжині елемента. Слід зазначити, що розподіл цих напружень у напрямку x^3 не обмежується

жодними конкретними умовами, що дає змогу використовувати формулу (18) для визначення вузлових реакцій не лише на пружній стадії матеріалу, але й за межами пружності з урахуванням приведення напружень відповідно до прийнятої умови текучості.

При отриманні формул для обчислення коефіцієнтів матриці жорсткості встановлено зв'язок між напруженнями та

деформаціями в рамках узагальненого закону Гука

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (20)$$

де елементи матриці визначаються відповідно до методів, описаних у роботі [11].

Підставивши вираз (20) у вираз (12), одержуємо

$$\delta W = \int_{x^1=-\frac{1}{2}}^{x^1=\frac{1}{2}} \int_{x^2=-\frac{1}{2}}^{x^2=\frac{1}{2}} \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \delta\{\varepsilon\}^T [D]\{\varepsilon\} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3. \quad (21)$$

Використовуючи вирази (14), отримаємо подання варіації енергії скінченного елемента через коефіцієнти розкладання переміщень у ряди Фур'є:

$$\begin{aligned} \delta W = & \int_{x^1=-\frac{1}{2}}^{x^1=\frac{1}{2}} \int_{x^2=-\frac{1}{2}}^{x^2=\frac{1}{2}} \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \sum_{\ell=1}^L \left(\delta\{U\}_\ell^T \right) \left([B_1]_{(\ell)}^T \sin \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} + \right. \\ & \left. + [B_2]_{(\ell)}^T \cos \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} [D] \sum_{n=1}^L \left([B_1]_{(n)} \sin \frac{n\pi(x^3+1)}{2} + [B]_{(n)} \cos \frac{n\pi(x^3+1)}{2} \right) \right) \cdot \\ & \cdot \{U\}_n \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3, \end{aligned} \quad (22)$$

зважаючи на те, що

$$\begin{aligned} & \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \sin \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} \sin \frac{n\pi(x^3+1)}{2} dx^3 \\ & \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \cos \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} \cos \frac{n\pi(x^3+1)}{2} dx^3 \\ & \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \sin \frac{\ell\pi(x^3+1)}{2} + \cos \frac{n\pi(x^3+1)}{2} dx^3 = 0. \end{aligned} \quad = \begin{cases} 0 \text{ при } \ell \neq n \\ 1 \text{ при } \ell = n \end{cases} \quad (23)$$

Після проведення інтегрування у формулі (22) зі змінною x^3

$$\delta W = \sum_{\ell=1}^L \left(\delta\{U\}_\ell^T \right) [K]_{\ell(\ell)} \{U\}_\ell,$$

де

$$[K]_{\ell(\ell)} = \int_{x^1=-\frac{1}{2}}^{x^1=\frac{1}{2}} \int_{x^2=-\frac{1}{2}}^{x^2=\frac{1}{2}} \left([B_1]_{\ell}^T + [B_2]_{\ell}^T \right) [D] ([B_1]_{\ell} + [B_2]_{\ell}) \sqrt{g} dx^1 dx^2. \quad (24)$$

Проводячи чисельне інтегрування за змінними x^1 і x^2 , отримуємо вираз для обчислення коефіцієнтів матриці жорсткості

призматичного скінченного елемента (СЕ1) зі змінними механічними та геометричними параметрами

$$[K]_{\ell(\ell)} = \int_{i=1}^I \int_{l=1}^I \left[\left([B_1]_{\ell}^T + [B_2]_{\ell}^T \right) [D] ([B_1]_{\ell} + [B_2]_{\ell}) \sqrt{g} H_i H_l \right]_{x_i^1, x_l^2}. \quad (25)$$

Дослідження збіжності результатів розрахунку отриманих різних методів з урахуванням пластичних властивостей матеріалу

Дослідження з урахуванням пластичних властивостей матеріалу виконані для нескінченної смуги прямокутного перерізу, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням. Як еталонний результат розрахунку використаємо розв’язання цієї задачі методом скінчених елементів. З урахуванням осі симетрії половина поперечного перерізу смуги апроксимується рівномірною сіткою скінчених елементів зі спільною кількістю вузлів $m = n \times n$, де

n – їхня кількість вздовж кожної зі сторін (рис. 4). Дані, що відображують вплив m на максимальні значення відносних зсувів $V_1 = U_1/a$ і $V_3 = U_3/a$, наведені в таблиці. Там же подана у відсотках похибка обчислення цих переміщень відносно результатів, отриманих при максимальній кількості вузлів розрахункової сітки – 169. Характер збіжності епюри V_1 вздовж осі Z^3 зображений на рис. 5. На основі наведених результатів розв’язання відповідно до $m = 169$ прийнято за еталонне для подальших досліджень.

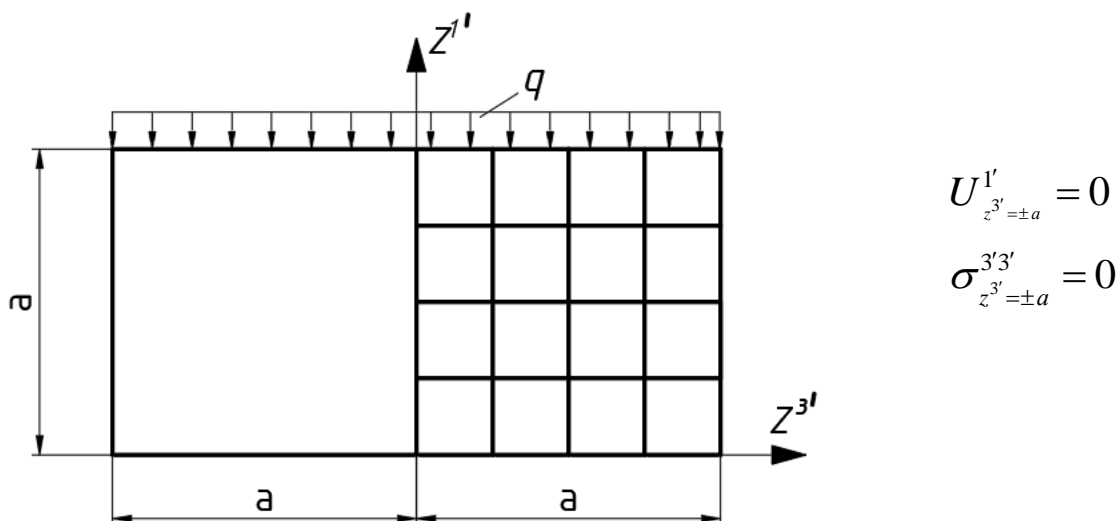


Рис. 4. Розрахункова модель нескінченної смуги прямокутного перерізу, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням

Таблиця

Значення переміщень і величина похибки залежно від кількості вузлів розрахункової моделі відносно еталонних результатів

m	v_{\max}^I	%	v_{\max}^3	%
9	1,710	23,2	0,837	28,6
25	2,010	9,7	1,028	12,4
81	2,188	1,7	1,142	2,6
169	2,226	-	1,173	-

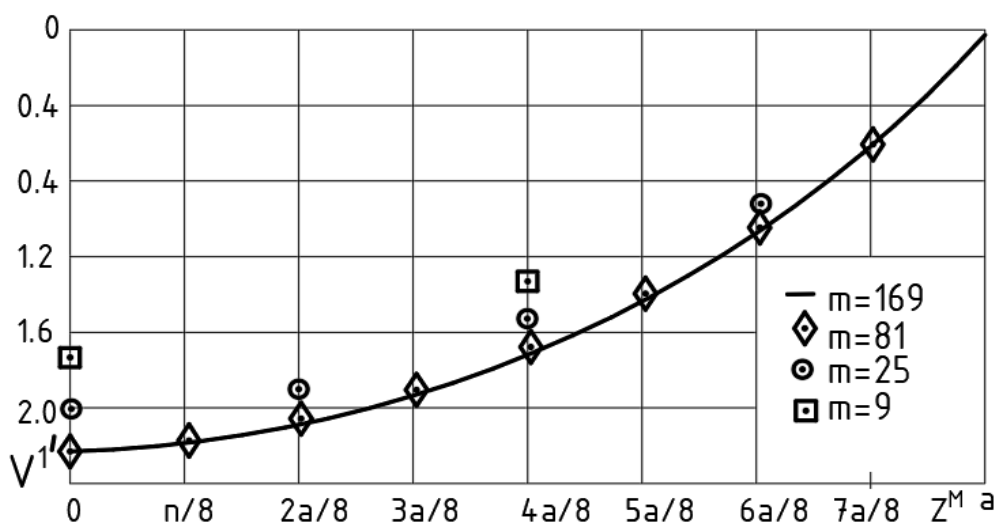


Рис. 5. Характер збіжності епюри V_1' вздовж осі Z^3

Результати зіставлення ефективності подання переміщень вздовж осі Z^3 різними координатними функціями наведені на рис. 6 у вигляді графіків, що відображують залежність похибок обчислень максимальних значень U_1' від кількості утримуваних членів розкладання M . Розрахунки виконані при фіксованій кількості скінченних елементів у напрямку Z^1 , яка дорівнює восьми, оскільки, як було встановлено раніше, подальше збільшення їхньої кількості незначно впливає на

результати розрахунків. Суцільна лінія відповідає рядам Фур'є, пунктирна – поліномам, штрих-пунктирна – скінченно-елементній дискретизації з кількістю вузлів сіткової області $n = M$ у напрямку Z^3 . Розбіжність результатів обчислення U_1' для двох перших випадків не перевищує частки відсотка у всьому діапазоні зміни M , що дає змогу зробити висновок про однакову швидкість збіжності поліномів R і рядів Фур'є в задачі, що розглядається.

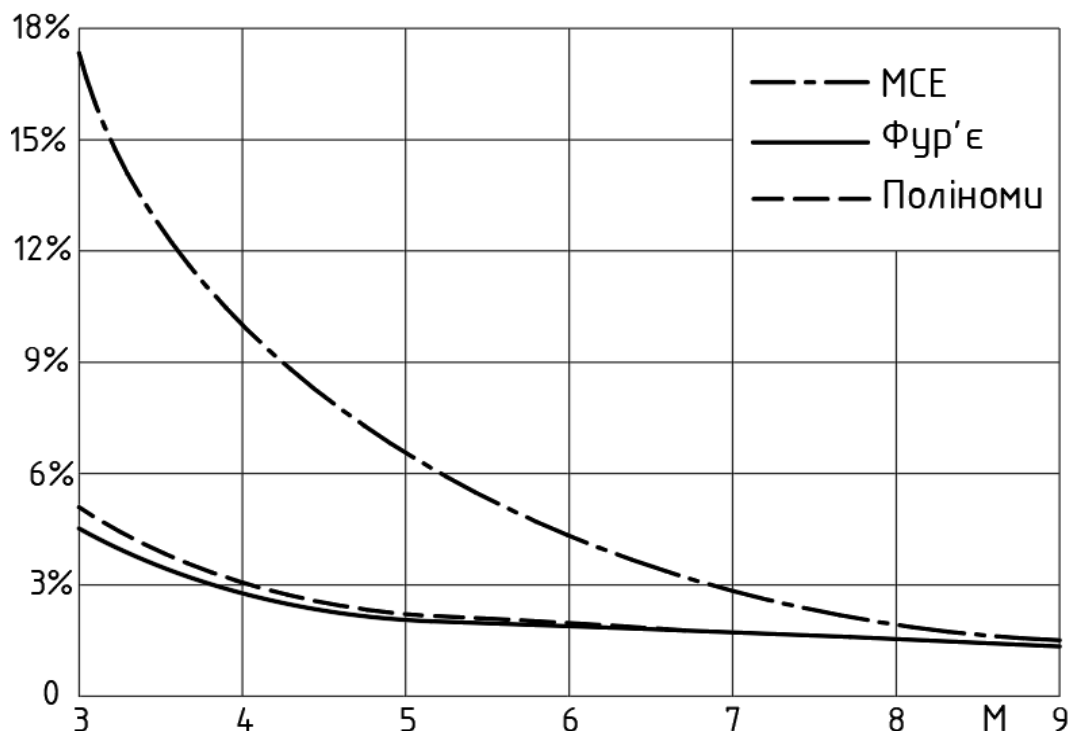


Рис. 6. Залежність похибок обчислень максимальних значень U_1 від кількості утримуваних членів розкладання M

У той же час слід зазначити значну перевагу НМСЕ порівняно з МСЕ. Так, утримання тільки п'яти членів розкладання забезпечує розв'язання задачі з такою самою точністю, як і при дев'яти вузлах сіткової області. Ці висновки підтверджуються порівнянням і інших параметрів напружено-деформованого стану смуги. На рис. 7 суцільною лінією наведені епюри еталонних значень інтенсивності пластичних

деформацій $\varepsilon_i^p = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p}$, що побудовані в перерізі $Z^{3'} = a$, на рис. 8 – відносних дотичних, $\bar{\sigma}^{1'3'} = \sigma^{1'3'} / \tau_s$ і нормальних $\bar{\sigma}^{3'3'} = \sigma^{3'3'} / \tau_s$ напружень, побудованих у перерізі $Z^{1'} = a$. Хрестиками позначені результати, отримані методом скінченних

елементів при дев'яти вузлах у напрямку $Z^{3'}$, кругами і ромбиками – НМСЕ при $M=5$ для рядів Фур'є і поліномів відповідно. Спостерігається гарна узгодженість у визначенні різних параметрів напружено-деформованого стану розглянутими підходами, проте збіжність НМСЕ майже у два рази вище за $Z^{3'}$, ніж МСЕ.

Висновки. Отже, можна зробити висновок, що поліноми і ряди Фур'є не поступаються щодо збіжності кусково-лінійній апроксимації переміщень при розрахунку призматичних тіл, які навантажені локалізованими впливами [9], і значно ефектніші в задачах з розподіленим навантаженням

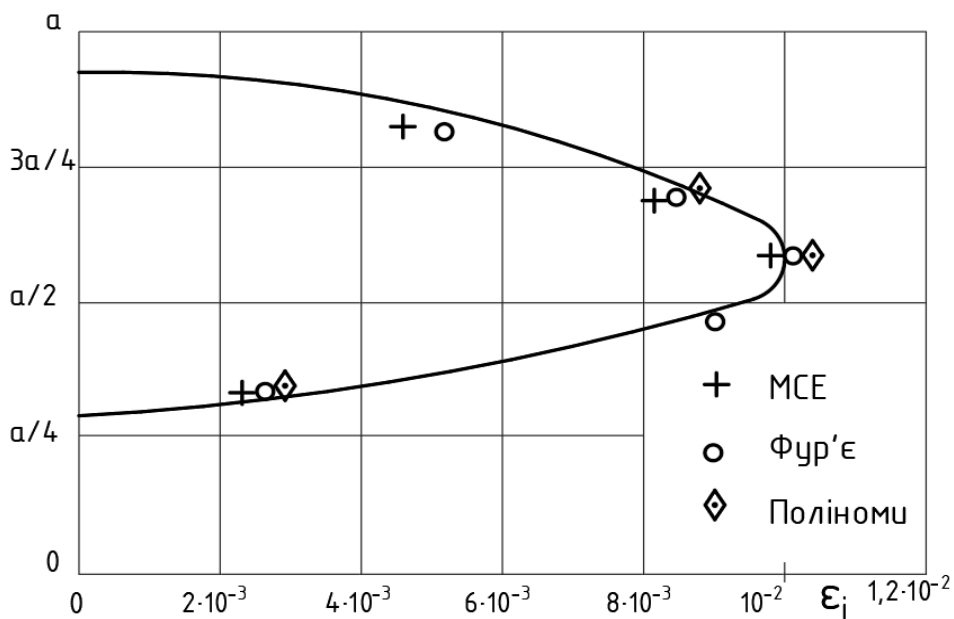


Рис. 7. Епюри розподілення еталонних значень інтенсивності пластичних деформацій, що побудовані в перерізі $Z^3 = a$

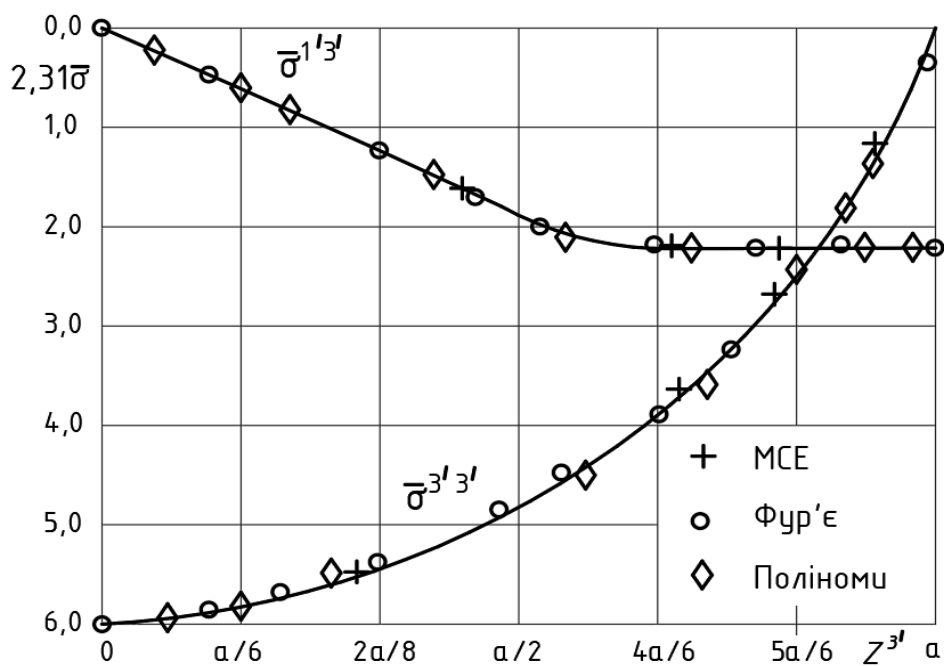


Рис. 8. Епюри розподілення значень нормальних і дотичних напружень, що побудовані в перерізі $Z^1 = a$

Список використаних джерел

1. Баженов В. А., Гуляр О. І., Пискунов С. О., Сахаров О. С. Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах руйнування просторових тіл. Київ : КНУБА, 2005. 298 с.

2. Баженов В. А., Гуляр О. І., Пискунов С. О., Сахаров О. С. Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах континуального руйнування просторових тіл. Київ: Каравела, 2014. 236 с.
3. Баженов В. А., Пискунов С. О., Максим'юк Ю. В. Метод скінченних елементів у задачах деформування та руйнування тіл обертання при термосиловому навантаженні. Київ: Каравела, 2018. 316 с.
4. Матриця жорсткості і вектор вузлових реакцій скінченного елемента для розв'язання просторових задач термов'язкопружнопластичності НМСЕ / В. А. Баженов, О. І. Гуляр, С. О. Пискунов та ін. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2005. № 76. С. 3–26.
5. Решение пространственных задач термовязкопластичности на основе ПМКЭ / В. А. Баженов, А. И. Гуляр, С. О. Пискунов, В. П. Андриевский. *Прикладная механика*. 2009. № 45. С. 60-75.
6. Алгоритм розв'язання системи лінійних та нелінійних рівнянь напіваналітичним методом скінчених елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл / Ю. Максим'юк, М. Гончаренко, І. Мартинюк, О. Максим'юк. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2020. Вип. 7. С. 101–108. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020>.
7. Semi-analytical method of finished elements in elastic and elastic-plastic position for curviline prismatic objects / V. A. Bazhenov, A. A. Shkriľ, Yu. V. Maksymiuk, I. Yu. Martyniuk, O. V. Maksymiuk. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2020. Is. 105. P. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.24-32>.
8. Reliability of results obtained by semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters / Y. V. Vorona, Yu. V. Maksimyuk, I. Yu. Martyniuk, O. V. Maksimyuk. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2021. Is. 107. P. 184-192. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.184-192>.
9. Андриєвський В. П., Мартинюк І. Ю., Максим'юк О. В. Чисельне дослідження збіжності рядів Фур'є, поліномів і методу скінченних елементів. *Збірник наукових праць НГУ*. 2023. № 74. С. 124-132. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.124>.
10. Максим'юк Ю., Козак А., Максим'юк О. Розв'язувальні співвідношення моментної схеми скінчених елементів в задачах термов'язкопружнопластичного деформування. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2019. № 4. С. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.4.2019.10-20>.
11. Вузлові реакції та коефіцієнти матриці жорсткості скінченого елемента на основі представлення переміщень поліномами / Ю. Максим'юк, О. Шкриль, І. Мартинюк, В. Бучко. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2021. № 9. С. 54–62. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.54-62>.

Андриєвський Віктор Петрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6172-8797>. Тел.: +38(044) 241-55-38. E-mail: vandriievskiy@hotmail.com.

Мартинюк Іван Юрійович, кандидат технічних наук, докторант кафедри будівельної механіки, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7957-2068>. Тел.: +38(096) 068-00-29. E-mail: ivan.martinyuk@gmail.com.

Максим'юк Олександр Всеволодович, аспірант кафедри будівельної механіки, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2367-3086>. Тел.: +38(067) 306-17-81. E-mail: sashamaksymiuk@gmail.com.

Andriievskiy Viktor, candidate of technical sciences, Associate Professor, department of structural mechanics, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6172-8797>. Tel.: +38(044) 241-55-38. E-mail: vandriievskiy@hotmail.com.

Martyniuk Ivan, candidate of technical sciences, doctoral student, department of structural mechanics, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7957-2068>.

Tel.: +38(096) 068-00-29. E-mail: ivan.martinyuk@gmail.com.

Maksymiuk Oleksandr, postgraduate student, department of structural mechanics, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2367-3086>. Tel.: +38(067) 306-17-81.

E-mail: sashamaksymiuk@gmail.com.

Статтю прийнято 08.02.2024 р.

УДК 625.1:691

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ НА КОРОЗИЙНІ ПРОЦЕСИ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛАХ

Д-р техн. наук А. А. Плуґін, аспіранти М. А. Муриґін, О. П. Крикун,
Е. Ф. Наджафов, В. В. Зінченко

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL POTENTIALS ON CORROSION PROCESSES IN REINFORCED CONCRETE SLEEVES

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, postgraduate students M. A. Murygin, O. P. Krykun,
E. F. Nadzhafov, V. V. Zinchenko

***Анотація.** Проведено експериментальні дослідження впливу електричних потенціалів на інтенсивність корозійних процесів у залізобетонних конструкціях підрейкових основ. Розроблено методику досліджень, яка передбачає створення цих впливів на моделі, та оцінювання їхніх наслідків. Створено впливи капілярного підняття, випаровування, дифузії, кристалізації солей, електричного потенціалу, передбачено оцінювання впливу електричного потенціалу на прискорення процесів перенесення та проявів ознак корозії. Виготовлено моделі та експериментальні установки, проведено дослідження. Експозицію моделей здійснювали у водному середовищі та розчині хлориду натрію без електричного впливу (як контроль) і під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу (ПОЕП). Встановлено, що під час впливу ПОЕП сила струму крізь моделі знижується, питомий електричний опір моделей зростає. ПОЕП прискорює проникнення іонів у модель у 4,43 раза, а також обумовлює більш сильні прояви ознак електрокорозії арматури. Прискорення перенесення іонів має прискорювати й корозійні процеси в бетоні, але їхнє дослідження доцільно проводити з більшими термінами експозиції моделей і з застосуванням фізико-хімічних методів. Рекомендовано засоби дренажу струмів, що стікають із рейок крізь шпала, і запропоновано усунути випуски арматури з їхніх торців.*

***Ключові слова:** залізобетонна шпала, струм витоку, електричний потенціал, електроміграційне перенесення іонів, електрокорозія.*

***Abstract.** Experimental studies of the influence of electric potentials on the intensity of corrosion processes in reinforced concrete structures of under-rail foundations have been conducted. A research methodology has been developed that involves the creation of these influences on models and the assessment of their consequences. The effects of capillary rise, evaporation, diffusion, crystallization of salts, electric potential have been created, and the impact of electric potential on*

the acceleration of transfer processes and manifestations of corrosion signs has been estimated. Models and experimental installations were made, research was conducted. The exposure of the models was carried out in an aqueous environment and in a sodium chloride solution without electrical influence (as a control) and under the influence of a pulsating unidirectional electric potential of the PUEP. It was established that the current through the models decreases under the influence of PUEP, and the specific electrical resistance of the models increases. PUEP accelerates the penetration of ions into the model by 4.43 times, and also causes stronger manifestations of signs of electrocorrosion of the armature. As a result of the exposure of the models without electrical influence in the water environment, weak corrosion of the armature outlets was noted, no corrosion of the armature was observed inside the model; in the sodium chloride solution, strong corrosion of the armature outlets and weak corrosion inside the model was observed. As a result of the influence of PUEP in the water environment, weak corrosion of the fittings was observed, inside the model, no corrosion of the fittings was observed; in the sodium chloride solution, weak corrosion of the armature outlets and strong corrosion was observed inside the model. It has been confirmed that the influence of PUEP significantly accelerates the transfer of ions in concrete and intensifies the corrosion processes of reinforcement. Acceleration of ion transport should also accelerate corrosion processes in concrete, but it is advisable to conduct their research with longer exposure periods of models and with the use of physicochemical methods. Means of draining the currents flowing from the rails through the sleepers were recommended and it was suggested to eliminate the armature discharges from their ends.

Keywords: reinforced concrete sleeper, leakage current, electric potential, electromigratory transfer of ions, electrocorrosion.

Вступ. Споруди залізничного транспорту – підрейкові основи, мости, водопропускні труби, тунелі, пасажирські та вантажні платформи тощо – експлуатуються в особливо складних умовах. Додатково до навантажень від рухомого складу, атмосферних впливів вони зазнають вібрації, абразивного впливу потоку повітря з частинками баласту від руху поїздів, впливу електричних струмів витоку з рейок. Руйнівний вплив постійного струму витоку на металеві конструкції та арматуру залізобетону відомий, заходи захисту від нього навіть унормовані, проте не завжди ефективно запобігають електрокорозії арматури. У роботах УкрДУЗТ у результаті теоретичних та експериментальних досліджень показано, що завдяки особливому пульсуючому через рух поїздів режиму струму бетон також зазнає електрокорозії, яка полягає в його електроміграційному вилуговуванні. Проте в зазначених експериментальних дослідженнях впливу електричного струму піддавали зразки лише бетону. У роботі [2]

проаналізовано шляхи струму крізь бетон і арматуру залізобетонної шпали і показано їхній взаємний вплив, який локалізує зони корозії і визначає її інтенсивність для арматури і бетону. Тому експериментальні дослідження впливу пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу на зразки бетону з арматурою (моделі шпал) та удосконалення заходів із захисту від електрокорозії є актуальними завданнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електрокорозія залізобетонних конструкцій не піддається сумніву, активно досліджується, розробляються заходи з захисту від неї [1–4]. У роботі [5] для залізобетону транспортних споруд пропонувано алгоритм оцінювання її ризику на основі статистичних методів. Проте ушкодження бетону в цих конструкціях звичайно пов'язують із тиском продуктів корозії арматури, статичними та динамічними навантаженнями, морозним руйнуванням, корозією в різних агресивних середовищах і не пов'язують із безпосереднім впливом електричних струмів [6]. Для

підвищення стійкості шпал до зазначених механічних і фізичних впливів а, отже, підвищення ресурсу для їх виготовлення застосовують високофункціональні бетони [7], дисперсно-армовані сталеву або полімерною фіброю фібробетони [8]. Ці бетони мають вищі показники міцності, у т. ч. ударної, зносостійкості, а також водонепроникності, морозостійкості, але їхні електротехнічні властивості не аналізуються і не регулюються, а в роботі [9] зазначено електрокорозійні пошкодження сталеві фібробетону.

У роботах [10–12] у результаті теоретичних та експериментальних досліджень доведено, що завдяки особливому пульсуючому синхронному руху поїздів, режиму струму бетон залізничних споруд також зазнає електрокорозії, яка полягає в його електроміграційному вилуговуванні. Крім того, показано, що такий пульсуючий однонаправлений електричний потенціал (ПОЕП) рf може інтенсифікувати за рахунок електроміграційного перенесення внутрішню корозію бетону від взаємодії луг цементу з реакційно здатними заповнювачами (Alkali-Silica Reaction ASR) [12–16]. Проте в зазначених експериментальних дослідженнях впливу електричного струму піддавали зразки лише бетону. У роботі [12] проаналізовано шляхи струму крізь бетон і арматуру залізобетонної шпали і показано їхній взаємний вплив, який локалізує зони корозії і визначає її інтенсивність для арматури і бетону. Отже, регулювання електротехнічних властивостей бетону як провідника другого роду та/або застосування електропровідних композицій для екранів-покриттів може запобігти утворенню зазначених зон корозії. Рекомендовано також заходи з дренажу струмів, що стікають з рейок крізь шпали та запропоновано виключити допущені випуски арматури з їхніх торців [12]. У світі успішно розробляють і удосконалюють бетони та суміші з керованою електропровідністю, яка регулюється переважно вуглеграфітовими наповнювачами [17, 18].

Їх застосовують переважно для нагрівальних елементів змінного струму різного призначення. Доведено доцільність застосування електропровідних композицій, здатних дренажувати струми з залізобетонних конструкцій, у т. ч. шпал [12].

Мета дослідження – встановлення показників прискорення корозійних процесів в арматурі та бетоні під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу (ПОЕП) для удосконалення заходів з запобігання їм. Для досягнення мети передбачені такі завдання: розроблення методики експериментальних досліджень впливу ПОЕП на корозійні процеси в бетоні та арматурі моделей залізобетонних шпал; проведення експериментальних досліджень і аналіз їхніх результатів.

Методика експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження виконували на моделях із цементно-піщаного розчину зі сталеву дротяною арматурою (рис. 1). На моделі створювали такі впливи:

1) капілярне підняття і випаровування води, вилуговування бетону – моделі занурені у воду на половину висоти (рис. 1, а);

2) капілярне підняття і випаровування води, електроміграційне від ПОЕП перенесення іонів – електроміграційне вилуговування бетону, електрокорозія арматури – моделі занурені у воду на половину висоти і на них накладено ПОЕП (рис. 1, б);

3) капілярне підняття і випаровування розчину з кристалізацією хлоридів – сольова корозія бетону, корозія арматури хлоридами – моделі занурені в розчин $NaCl$ 3 % на половину висоти (рис. 1, в);

4) капілярне підняття і випаровування розчину, електроміграційне від ПОЕП перенесення іонів, у т. ч. хлорид-іонів із кристалізацією хлоридів – електроміграційне вилуговування бетону, інтенсифікація сольової корозії бетону та електрокорозія арматури – моделі занурені в розчин $NaCl$ 3 % на половину висоти і на них накладено ПОЕП (рис. 1, г).

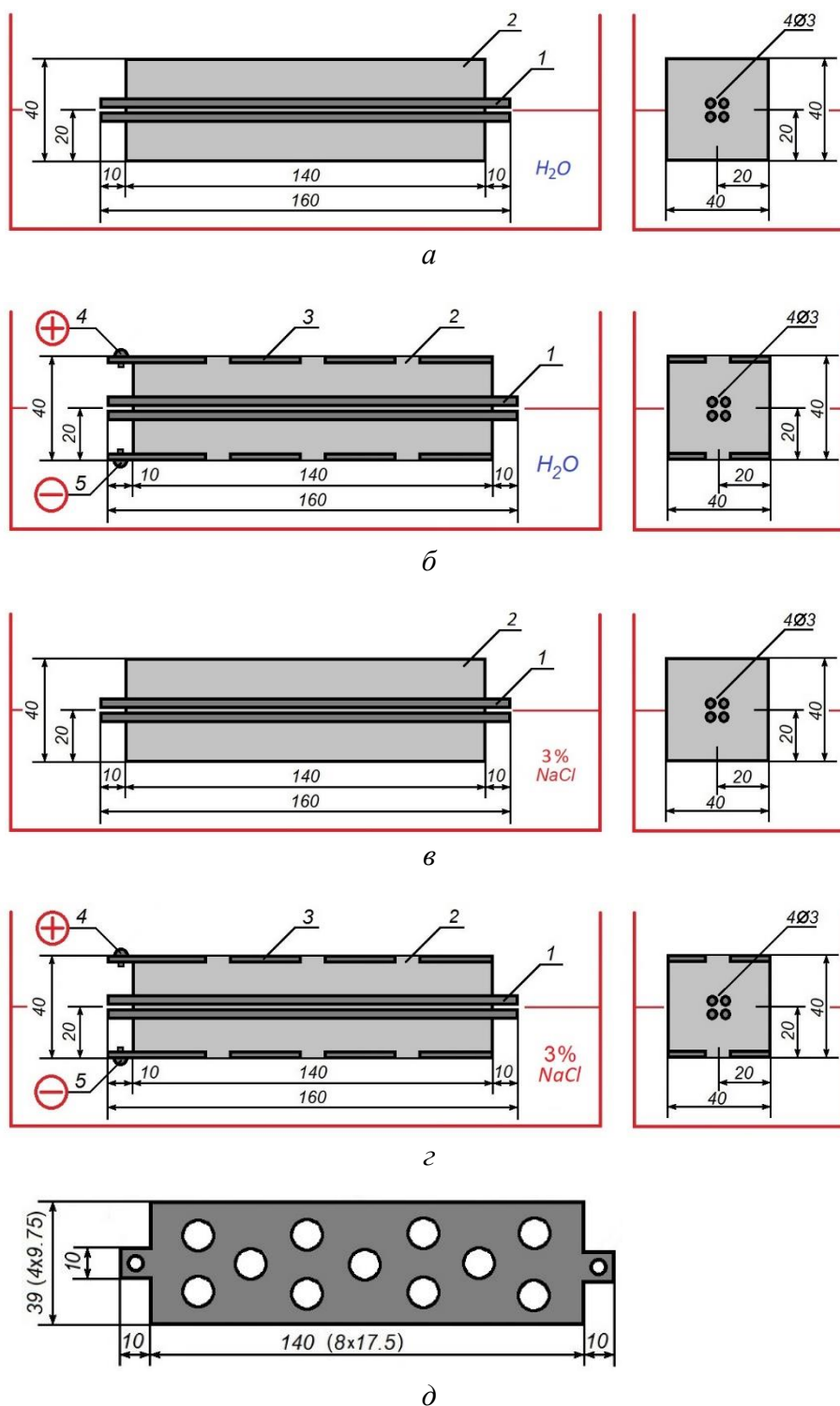


Рис. 1. Схеми створення агресивних впливів на моделі:
 а, в – капілярного підняття, випаровування та кристалізації, у т. ч. хлоридів (в);
 б, г – електроміграційного від ПОЕП перенесення, у т. ч. хлоридів (г); д – накладний перфорований сталевий електрод; 1 – сталевий дріт діаметром 3 мм; 2 – цементно-піщаний розчин (цементний камінь); 3 – електроди; 4 – контакт з позитивним полюсом; 5 – контакт з негативним полюсом

Моделі 1 і 3 без електричного впливу є контрольними для моделей 2 і 4 з впливом ПОЕП.

Електричний вплив полягав у накладанні ПОЕП 38 В з режимом пульсації: увімкнено – 15 хв, вимкнено – 10 хв через накладні перфоровані сталеві електроди (рис. 1, *д*): зверху – позитивного, знизу – негативного (рис. 1, *б*, *з*), що відповідає умовам експлуатації шпал (рис. 6, 7 [12]). Експозицію моделей без електричного впливу здійснювали впродовж 11 діб, з впливом ПОЕП – вісім діб.

Під час експозиції вимірювали величину сили струму I , А, крізь модель і будували графіки зміни в часі t сили струму I та питомого електричного опору ρ , який розраховували як, Ом \times м,

$$\rho = Ula/Ih, \quad (1)$$

де U – напруга, 38 В;

l , a – довжина і ширина моделі (електродів), 0,07 і 0,04 м відповідно;

h – висота моделі, 0,04 м.

Моделі виготовляли з цементно-піщаного розчину у вигляді балочок розміром 140 \times 40 \times 40 мм, армованих пучком дроту періодичного профілю з високовуглецевої сталі 4 \varnothing 3 мм (рис. 1). Розчин виготовляли з портландцементу СЕМ І 42,5 R і піску кварцового з розмірами зерен 0,2–0,3 мм. Склад розчину відповідав розчинній складовій бетону шпал Ц:П = 1:1,53 з водоцементним відношенням В/Ц = 0,35. Для виготовлення моделей застосовували стандартні форми зразків-балочок 160 \times 40 \times 40 мм (рис. 2). Для фіксації арматури і забезпечення її випусків, а також приформування електродів виготовляли вкладиші з фанери товщиною 10 мм, які перед формуванням моделей вкладали у форму (рис. 2). У вільних гніздах форм виготовляли зразки-балочки 160 \times 40 \times 40 мм для визначення фізико-механічних характеристик цементно-піщаного розчину.



Рис. 2. Фіксація арматури та накладних електродів у формах

Цементно-піщаний розчин моделей ущільнювали на стандартному лабораторному вібромайданчику з частотою коливань 50 Гц і амплітудою 0,2–0,3 мм. Для прискорення твердіння моделі піддавали тепловологісній обробці в лабораторній пропарювальній камері з ізотермічною витримкою 6 год за температури 60 °С. Після пропарювання моделі розпалублювали і витримували три доби до

експозиції (рис. 3). Перед експозицією моделей зразки-балочки випробували з визначенням середньої щільності та міцності на стиск. Властивості розчину у віці шість діб: середня щільність – 2044 кг/м³, міцність на стиск 31,4 МПа, міцність на розтяг 6,9 МПа.

Моделі з електродами розрізали навпіл на станку з алмазним відрізним кругом без охолодження водою (для запобігання

вимивання хлоридів) і для електричної ізоляції верхньої грані від нижньої та мінімізації поверхневого протікання струму

по поверхні бічних граней наносили смугу з алкідної емалі (рис. 3).



Рис. 3. Моделі для експозиції в агресивних середовищах без електричного впливу та з електричним впливом – з накладними електродами та нанесеним на бічні грані поясом із алкідної емалі

Для накладання ПОЕП на моделі застосовували джерело постійного струму, що генерувало постійну напругу 38 В, для створення пульсуючого режиму – програмований вмикач-вимикач, вимірювання сили струму здійснювали цифровим мультиметром Sanwa PC510 (рис. 4, а).

Експериментальні установки збирали в контейнерах із діелектричного матеріалу (рис. 4). У контейнерах моделі поміщували на діелектричні підставки. Контейнери заповнювали водою або розчином до половини висоти моделі чи електроізоляційного поясу на ній. Для створення електричного впливу верхній електрод підключали до позитивного полюса джерела живлення, нижній – до негативного. Воду та розчин заміняли щоденно, електроди під час заміни води та розчину оглядали, очищували від продуктів

корозії, за необхідності – заміняли. Під час заміни води та розчинів і обслуговування електродів напругу вимикали. Силу струму вимірювали один раз на добу двічі – безпосередньо перед заміною води і розчину і одразу після.

Після експозиції моделі розрізали на зразки розміром 40×40×20 мм. Грані зразків розміром 40×40 мм, що відповідають поперечними перерізам моделей, досліджували з визначенням глибин нейтралізації та проникнення хлоридів, а також піддавали петрографічним дослідженням.

Для визначення глибини можливої нейтралізації цементно-піщаного розчину зрізи обробляли розчином фенолфталеїну 1% в етанолі, за нейтралізований шар приймали шар розчину, який не забарвлювався в малиновий колір.

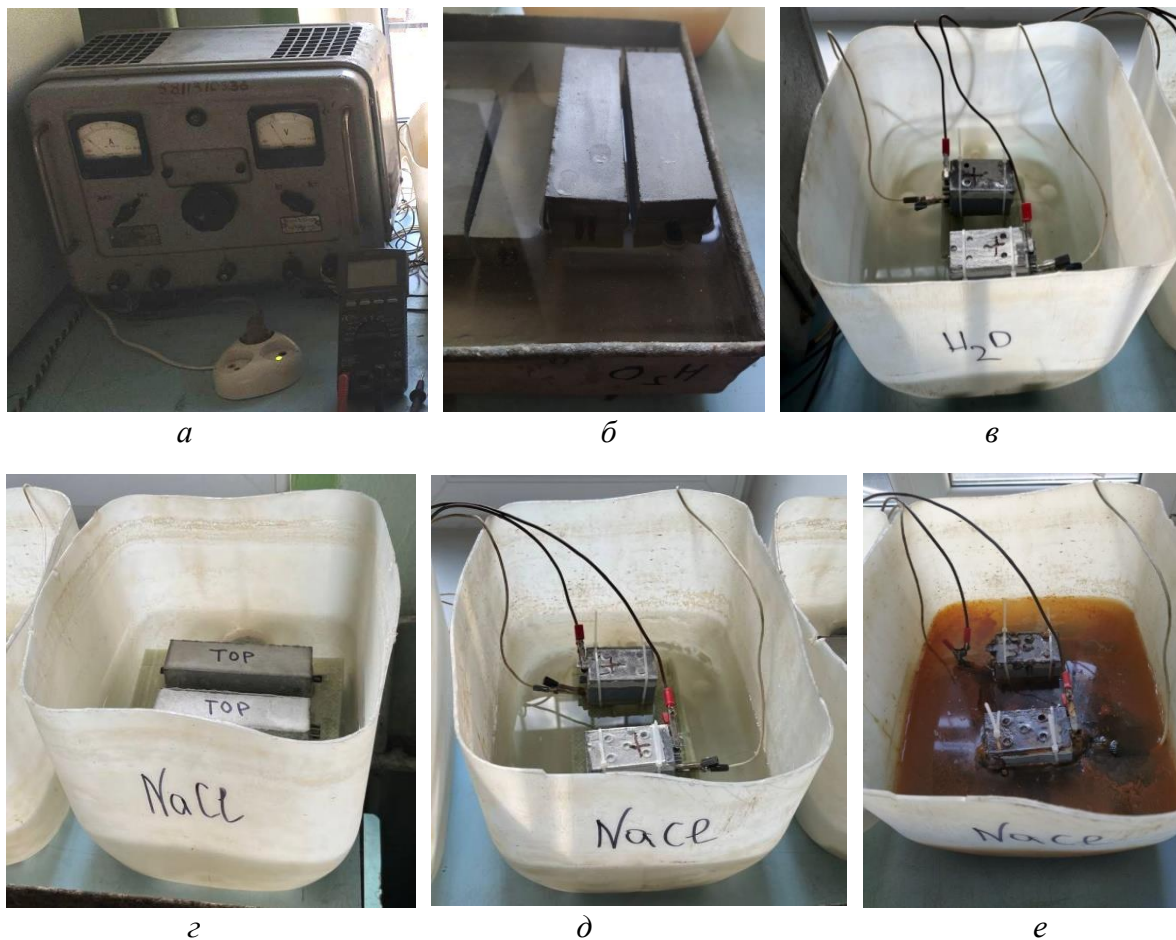
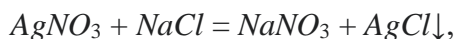


Рис. 4. Експериментальні установки з джерелом постійного струму, програмованим вмикачем-вимикачем і цифровим мультиметром Sanwa PC510 (а) для експозиції моделей в умовах капілярного підняття, випаровування та кристалізації, у т. ч. хлоридів (з, д, е) без електричного впливу (б, з) і з електричним впливом (електроміграційним перенесенням (в, д, е)) одразу після вмикання (в, д) і після 1,5 доби експозиції (е)

Глибину проникнення хлоридів визначали за допомогою розчину нітрату срібла. Для якісного визначення хлор-іонів застосовували нітрат срібла (азотнокисле срібло) $AgNO_3$, зокрема реакцію його взаємодії з хлоридами:



де $AgCl$ – білий сироподібний осад.

Для визначення глибини проникнення хлоридів на зріз наносили водний розчин 1% нітрату срібла, вимірювали глибину проникнення хлоридів x , як товщину шару,

на якому утворився світлий наліт, за результатами декількох вимірювань розраховували середнє значення x .

Петрографічні дослідження виконували за допомогою світлового мікроскопу МБС-2 зі збільшенням 7,5–82,5. Досліджували зону контакту сталеві дротяної арматури з цементно-піщаним розчином на зрізах після агресивних впливів.

Результати дослідження та їх обговорення. Графіки зміни в часі сили струму в моделях і питомого електричного опору моделей впродовж впливу ПОЕП у водному середовищі та розчині хлориду натрію наведені на рис. 5.

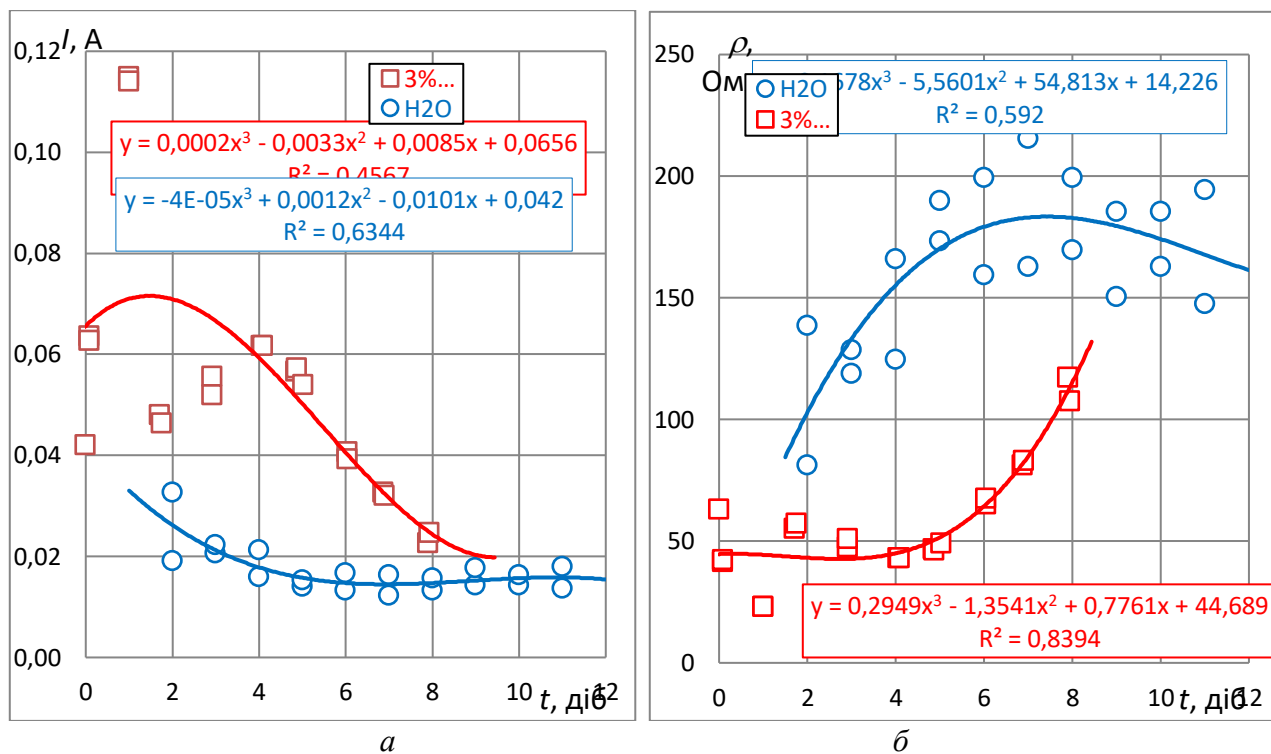


Рис. 5. Зміна з часом сили струму в моделях (а) та електричного опору моделей (б) впродовж впливу ПОЕП у водному середовищі (H₂O) і розчині NaCl 3 %

Із графіків рис. 5 видно, що в моделях, які експонуються у водному середовищі, сила струму I на початку експозиції складає 0,03 А, питомий електричний опір ρ , розрахований за формулою (1), – 70 Ом·м. З експозицією I поступово знижується на 50 %, а ρ збільшується у 2,57 раза і через п'ять діб досягають величин 0,015 А і 180 Ом·м, після чого істотно не змінюються. У моделях, що експонуються в розчині NaCl 3 %, I на початку експозиції складає 0,06 А, через одну добу збільшується до 0,07 А, очевидно, з проникненням у модель хлорид-іонів, а потім знижується, через вісім діб досягаючи 0,02 А. Відповідно ρ збільшується з 40 до 130 Ом·м. Такі зміни сили струму I та питомого електричного опору ρ задовільно апроксимуються поліномами третього ступеня з коефіцієнтами кореляції 0,68, 0,8 (рис. 5, а) і 0,77, 0,92 (рис. 5, б) відповідно. Зниження сили струму та збільшення питомого електричного опору впродовж

експозиції обумовлене, очевидно, зниженням пористості цементного каменю внаслідок догідратації клінкерних реліктів, у т. ч. з утворенням гідрохлоралюмінатів, поляризаційними явищами. Це певною мірою відповідає концепції адаптації бетону до агресивних впливів [19].

Під час експозиції в моделей, які експонували в розчині хлориду натрію під електричним впливом, спостерігалась інтенсивна корозія електродів і забарвлення розчину в коричневий колір, характерний для гідроксидів заліза (рис. 4, е), один раз електроди було замінено.

Зовнішній вигляд моделей після експозиції наведено на рис. 6. Після експозиції на вільних від емалі поверхнях випусків сталевих арматур моделей, які експонували у водному середовищі без електричного впливу, спостерігався наліт коричневого кольору (рис. 6, а), характерного для Fe(OH)₂. На поверхнях випусків сталевих арматур моделей, які

експонували в розчині $NaCl$ без електричного впливу, спостерігалися продукти корозії темно-коричневого кольору (рис. 6, *в*), характерного для $Fe(OH)_3$. У моделей, що експонували в розчині $NaCl$ із впливом ПОЕП, спостерігався наліт коричневого кольору $Fe(OH)_2$ (рис. 6, *г*) як на випусках арматури, так і поверхні розчину.

На моделях, що піддавали впливу ПОЕП у воді, на верхньому (позитивному)

електроді ознак корозії не спостерігалося, на нижньому (негативному) спостерігався наліт коричневого кольору $Fe(OH)_2$ (рис. 6, *б*). На обох електродах моделей, що піддавали електричному впливу в розчині $NaCl$, спостерігалися корозійні ушкодження у вигляді виразок і значна кількість продуктів корозії темно-коричневого кольору $Fe(OH)_2$ (рис. 6, *г*).



Рис. 6. Моделі після експозиції: *а, б* – у водному середовищі без електричного впливу (*а*) і під впливом ПОЕП (*б*); *в, г* – у розчині хлориду натрію без електричного впливу (*в*) і під впливом ПОЕП (*г*)

Нейтралізація цементного розчину за реакцією з фенолфталеїном у межах чутливості цієї реакції на жодній із моделей не спостерігалася (рис. 7).

Проникнення хлоридів спостерігалося на всіх моделях, що експонувались у розчині $NaCl$, без електричного впливу – на глибину до 9 мм (рис. 7, *а*), під впливом ПОЕП – на глибину до 29 мм з концентруванням навколо арматури (рис. 7, *б*). Швидкість проникнення хлоридів у розчин за рахунок капілярного підняття і дифузії без електричного впливу склала близько $9/11 = 0,82$ мм/доба або 299 мм/р., із впливом ПОЕП за рахунок електроміграційного перенесення – $29/8 = 3,63$ мм/доба або 1323 мм/р. Отже, ПОЕП за рахунок

електроміграційного перенесення прискорив перенесення хлорид-іонів у 4,43 раза.

Отримані в результаті петрографічних досліджень знімки зрізів моделей наведені на рис. 8, із якого видно, що всередині моделей, які експонували у водному середовищі як без електричного впливу, так і з впливом ПОЕП, ознак корозії арматури не спостерігалося. Усередині моделей, які експонували в розчині $NaCl$, спостерігались ознаки корозії арматури: без електричного впливу – коричневі плями на всьому зрізу дротин (можливо перенесені з границі дротини на поверхню зрізу під час різання), із впливом ПОЕП – рясні продукти корозії та краплини рідини коричневого кольору (незважаючи на застосоване сухе різання) на

границі між арматурою і цементним каменем.

Результати досліджень узагальнені в таблиці.

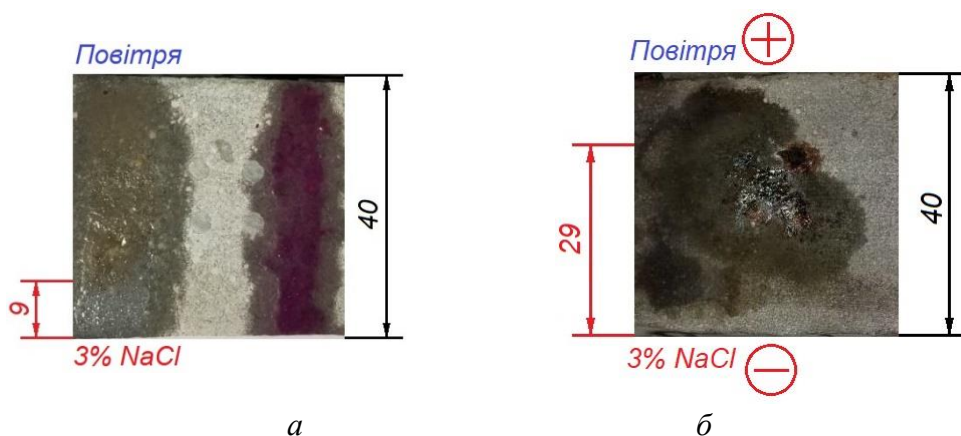


Рис. 7. Визначення за допомогою розчину фенолфталеїну глибини нейтралізації і за допомогою нітрату срібла глибини проникнення хлоридів у моделі внаслідок експозиції в розчині хлориду: *a* – без електричного впливу; *б* – під впливом ПОЕП

Таблиця

Узагальнені результати дослідження агресивних впливів на моделі

Показник		Величина для агресивного впливу			
		H_2O		Розчин $NaCl$ 13 %	
Електричний вплив		Нема	ПОЕП 38 В	Нема	ПОЕП 38 В
Сила струму, А, на стадії експозиції	на початку I_0	-	0,030	-	0,07
	наприкінці I	-	0,015	-	0,02
Зниження сили струму $(I_0-I)/I_0$, %		-	50	-	71,4
Питомий електричний опір, Ом·м, на стадії експозиції	на початку ρ_0	-	70	-	40
	наприкінці ρ	-	180	-	130
Збільшення питомого електричного опору ρ/ρ_0		-	2,57	-	3,25
Вилугування (нейтралізація за фенолфталеїном)		Не спостерігається			
Проникнення хлоридів (за нітратом срібла)	глибина, мм	-	-	9	29
	швидкість, мм/доба	-	-	0,82	3,63
	прискорення, раз	-	-	-	4,43
Корозія арматури та продукти корозії	всередині	Нема	Нема	Слабка $Fe(OH)_2$	Сильна $Fe(OH)_2$
	випусків	Слабка $Fe(OH)_2$	Слабка $Fe(OH)_2$	Сильна $Fe(OH)_3$	Слабка $Fe(OH)_2$
Корозія електродів і продукти корозії		-	Слабка $Fe(OH)_2$	-	Сильна $Fe(OH)_3$
Рисунки		4, б; 6, а; 8, а	4, в; 6, б; 8, б	4,г; 6,в; 7, а; 8,в	4, д, е; 6, г; 7, б; 8, г

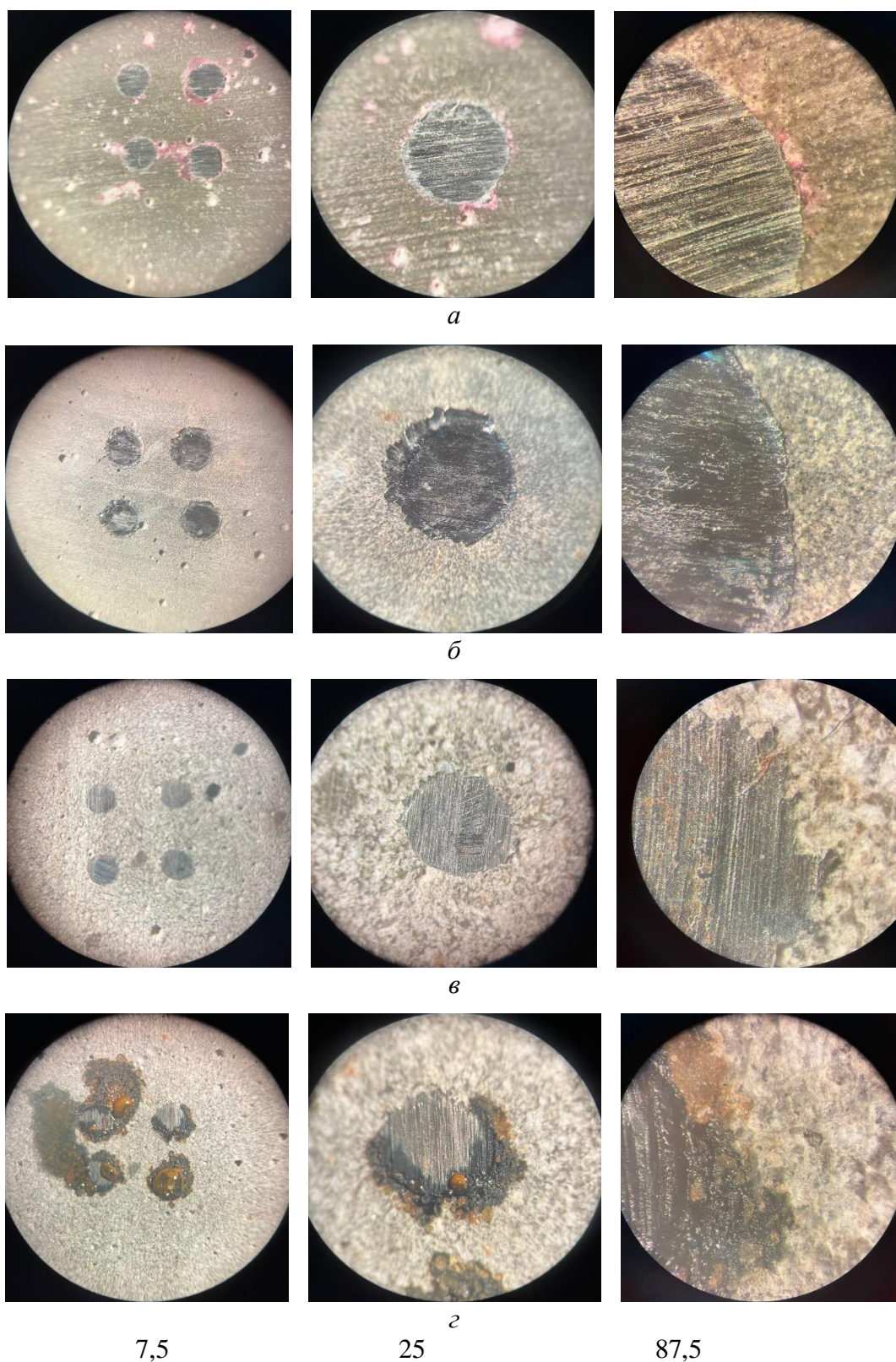


Рис. 8. Зрізи моделей після експозиції: *a, б* – без електричного впливу у водному середовищі (*a*) і в розчині хлориду натрію (*б*); *в, z* – під впливом ПОЕП у водному середовищі (*в*) і в розчині хлориду натрію (*z*)

Висновки та рекомендації.

Розроблено методику дослідження електричного впливу на інтенсивність корозійних процесів у залізобетонних конструкціях підрейкових основ, яка передбачає створення цього впливу на моделі конструкцій та оцінювання їхніх наслідків. Методи передбачають дослідження впливів і їхніх наслідків: капілярного підняття і випаровування води – вилуговування бетону; капілярного підняття і випаровування води з електроміграційним перенесенням іонів під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу ПОЕП – електроміграційного вилуговування бетону та електрокорозії арматури; капілярного підняття і випаровування розчину з дифузиею та кристалізацією хлоридів – сольової корозії бетону, корозії арматури хлоридами; капілярного підняття і випаровування розчину $NaCl$ з електроміграційним перенесенням іонів під впливом ПОЕП, у т. ч. хлорид-іонів із кристалізацією хлоридів – електроміграційного вилуговування бетону, інтенсифікації сольової корозії бетону та електрокорозії арматури.

Згідно з розробленою методикою виготовлено моделі та експериментальні установки, проведено дослідження. Здійснювали експозицію моделей у водному середовищі та розчині хлориду натрію без електричного впливу (як контроль) і під впливом ПОЕП.

Встановлено, що впродовж впливу ПОЕП сила струму крізь моделі знижується на 50 % у водному середовищі та на 71,4 % у розчині хлориду натрію, питомий

електричний опір моделей зростає у 2,57 і 3,25 раза відповідно.

Нейтралізація цементного каменю в усіх моделях не спостерігалася. Дифузійне проникнення хлоридів без електричного впливу відбувається зі швидкістю 0,82 мм/доба, під впливом ПОЕП – зі швидкістю 3,63 мм/доба, отже, ПОЕП прискорює проникнення іонів у модель у 4,43 раза.

У результаті експозиції моделей без електричного впливу у водному середовищі відзначалася слабка корозія випусків арматури, всередині моделі корозія арматури не спостерігалася; у розчині хлориду натрію спостерігалася сильна корозія випусків арматури і слабка всередині моделі. У результаті впливу ПОЕП у водному середовищі відзначалася слабка корозія випусків арматури, всередині моделі корозія арматури не спостерігалася; у розчині хлориду натрію спостерігалася слабка корозія випусків арматури та сильна всередині моделі.

Отже, підтверджено, що вплив ПОЕП суттєво прискорює перенесення іонів у бетоні та інтенсифікує процеси корозії арматури. Прискорення перенесення іонів має прискорювати й корозійні процеси в бетоні, але їх дослідження доцільно проводити з більшими термінами експозиції моделей і з застосуванням фізико-хімічних методів.

Підтверджено рекомендації [12] щодо доцільності дренавання струмів, що стікають із рейок крізь шпали, і необхідності усунення випусків арматури з їхніх торців.

Список використаних джерел

1. Thorsten Eichler, Bernd Isecke. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>.
2. Liu Y.-C., Chang E.-C., Shyu J.-L., Chen X.-G. Dynamic Analysis of the Leakage Current Corrosion for the Non-Grounded DC Railway Systems. *International Journal of Electrical Energy*. 3(4). 257-261 (2015).

3. Duranceau S. J., Johnson W. J., Pfeiffer-Wilder R. J. A study examining the effect of stray current on the integrity of continuous and discontinuous reinforcing bars. *Experimental Techniques*. 35 (2011). 53-58.
4. Bertolini L., Carsana M., Pedeferra P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. *Corrosion Science*. 49 (2007). 1056–1068.
5. Ju Myong, Jin Kim, Kim Gwon. Investigation of the forecast algorithm for assessing the risk of electrocorrosion in the lining of railway tunnels. *Transport Technician*. 1 (3) (2020).
6. Mindess S. Resistance of concrete to destructive agencies. In book: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier. (2019) 251–283.
7. Bae Y., Pyo S. Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance. *Engineering Structures*. 210 (2020). 110374.
8. Sadeghi J., Tolou Kian A. R., Shater Khabbazi A. Improvement of mechanical properties of railway track concrete sleepers using steel fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 28 (11) (2016). 04016131
9. Kangkang Tang. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 100 (2017). 445-456.
10. Плугін О. А. Дослідження впливу величини напруги пульсуючого однонаправленого електричного поля на електрокорозію бетону. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 115 (2010). 56-67.
11. Плугін О. А., Борзяк О. С., Мартинова В. Б., Халюшев О. К. Електричні впливи на бетон (електрообробка та захист від електрокорозії бетонів, виробів і конструкцій із них). Харків: Форт, 2013. 300 с.
12. Розвиток уявлень про електрокорозію конструкцій залізничної колії та удосконалення способів їхнього захисту з застосуванням електропровідних композицій / А. А. Плугін, О. С. Борзяк, О. А. Плугін та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 204 (2023). 35-52. URL: <http://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283877>.
13. Stark J. Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Bauhaus Universität Weimar. (2008). 139 p.
14. Kurdowski W. *Chemia Cementu i Betonu*. Kraków (2010) 728 str.
15. Коваленко В. В., Заяць Ю. Л., Пшінько П. О. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії ПЧ-10 Одеської залізниці. *Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна*. 6 (2015). 149–163.
16. Krivenko P., Gelevera O., Kovalchuk O., Bumanis G., Korjakins A. Alkali-aggregate reaction in alkali-activated cement concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 660(1) (2019). 012002.
17. Baoguo Han, Liqing Zhang, Jinping Ou. Electrically Conductive Concrete. In book: *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*, 2017. P. 247-259.
18. Cordon H. C. F., Tadini F. B., Akiyama G. A., de Andrade V. O., da Silva R. C. Development of electrically conductive concrete. *Cerâmica*. 66 (377). 2020.
19. Чернявський В. Л. Адаптація бетону і залізобетону – ресурс довговічності будівельних конструкцій. *Будівництво України*. 3 (2007). 2–5.

Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Муригін Максим Андрійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Крикун Оксана Петрівна, аспірантка кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. Тел.: +380957781771. E-mail: 0509ksushka@gmail.com.

Наджафов Ельшад Фаед огли, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6143-8183. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: bmcs@kart.edu.ua.

Зінченко Владислава Володимирівна, аспірантка кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. Тел.: +38 (099) 601-34-25. E-mail: f23vladislava11v@gmail.com.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel. +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Murygin Maksim, postgraduate student, department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Krykun Oksana, postgraduate student, department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: krikun@kart.edu.ua.

Nadzhafov Elshad, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6143-8183. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: bmcs@kart.edu.ua.

Zinchenko Vladyslava, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. E-mail: zinchenko@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 19.03.2024 р.

УДК 624.9:624.07:628.5

ПРОГНОЗУВАННЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСУ МЕТАЛЕВОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Д-р техн. наук А. А. Плуґін, кандидати техн. наук В. Д. Жван, О. В. Лобяк, О. М. Назаренко, асп. С. В. Микитась

FORECASTING THE FINAL RESOURCE OF THE METAL CHIMNEY PIPE OF NON-FRONTIER METALLURGY

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, candidats of eng. scien. V. D. Zhvan, O. V. Lobyak, O. M. Nazarenko, postgraduate student S. V. Mykytas

***Анотація.** Виконано комплексне дослідження корозійних процесів, пошкоджень і несучої здатності металевої димової труби, що відводить газодимову суміш, утворювану в технологічних процесах кольорової металургії, і розроблено методику прогнозування її остаточного ресурсу. Виконано аналіз складу і температурно-вологісного режиму зазначеної суміші, встановлено ступінь агресивної дії середовища, яке спричиняє корозію труби зсередини. У результаті аналізу результатів замірів товщини стінки труби визначено глибину корозійних ушкоджень і швидкість корозії. Показано, що інтенсивність корозії за висотою труби відрізняється. Виконано аналіз напружено-деформованого стану труби з урахуванням корозійних пошкоджень, визначено найбільш навантажену небезпечну зону і її конструкції, визначено граничні значення товщини стінки та глибини корозійного пошкодження в перерізах, які забезпечують виконання умов до несучої здатності. Виходячи з величин швидкості корозії для всіх перерізів визначено час досягнення граничного стану.*

Показано, що без заходів із ремонту і захисту остаточний ресурс труби не перевищує дев'ять років. Для збільшення остаточного ресурсу труби до 18 років рекомендовано замінити верхню частину труби, а понад 18 років – здійснити антикорозійний захист її внутрішньої поверхні. Показано, що додаткове понад 18 років збільшення остаточного ресурсу дорівнюватиме терміну служби покриття, за умови своєчасного відновлення якого остаточний ресурс труби може бути доведений до 70–80 років.

Ключові слова: димова металева труба, агресивні гази, корозія, прогнозування довговічності.

Abstract. A comprehensive study of corrosion processes, damage and load-bearing capacity of a 45-m-high metal smoke pipe, which removes the gas-smoke mixture formed in the technological processes of non-ferrous metallurgy, was carried out, and a methodology for forecasting its final resource was developed. As a result of the analysis of the composition and temperature-moisture regime of the specified mixture, it was established that it is a gaseous medium aggressive to steel and causes corrosion of the pipe from the inside. As a result of the analysis of the results of the pipe wall thickness measurements, it was established that the corrosion rate was 0.12–0.26 mm/year, which corresponds to the medium aggressive degree of action of the gaseous medium on carbon steel. According to the intensity of corrosion, the pipe is divided into three conventional zones: the lower non-ventilated stagnation zone of corrosion of medium intensity below the chimney inlet; the average well-ventilated zone of less intense corrosion above the chimney inlet; the upper zone of condensate formation and the most intense corrosion. Analysis of the stress-strain state of the pipe taking into account corrosion damage showed that the most loaded dangerous zone of the structure is the place where the horizontal chimney cuts in, and the bearing capacity of the pipe is provided with a material utilization factor of 0.62–0.65. The limit values of the wall thickness and depth of corrosion damage in the cross-sections, which ensure the fulfillment of the conditions for the bearing capacity, have been determined. Based on the values of the corrosion rate, the time to reach the limit state was determined for all sections. In the lower, middle and upper zones of the pipes, the limit state will be reached after 18, 25 and 9 years, respectively, so without measures for repair and protection, the final resource of the pipe does not exceed 9 years. To increase the final service life of the pipe, it is recommended to replace the upper part of the pipe up to 18 years, and after 18 years - to protect the inner surface with heat-resistant organic silicon or epoxy enamel. Additional over 18 years of increase in ultimate life will equal the service life of the coating. Provided timely restoration of the anti-corrosion coating, the final resource of the pipe can be brought to the durability indicators of reinforced concrete and brick pipes of 70-80 years.

Keywords: smoke metal pipe, aggressive gases, corrosion, durability prediction.

Вступ. У багатьох об'єктах промисловості та паливно-енергетичного комплексу для забезпечення тяги під час згоряння палив і відведення продуктів згоряння використовуються димові труби [1]. До другої половини ХХ століття застосовувалися переважно цегляні труби. У разі якісного зведення та належного утримання завдяки достатнім фізико-механічним характеристикам і хімічній інертності кераміки такі труби мали високу довговічність. Багато труб поважного віку

збереглися у настільки доброму стані, що на них встановлюють пристрої мереж мобільного зв'язку. Проте через ускладненість зведення індустріальними способами будівництво цегляних труб поступово зійшло нанівець. Останні 30 років в Україні труби висотою понад 60 м будуються переважно залізобетонними збірними або монолітними, до 60 м – металевими. Незважаючи на значно меншу масу, більш високу індустріальність виготовлення, монтажу та навіть демонтажу й утилізації

металевих труб, їх застосування в разі висоти понад 60 м стримується збільшенням металоємності через необхідність облаштування каркасів, ускладненістю облаштування відтяжок у щільній промисловій забудові тощо.

Припускається, що металеві труби в разі використання футерування та/або сучасних засобів захисту від корозії, за довговічністю не поступаються цегляним і залізобетонним [1]. Проте через порівняно нетривалий досвід будівництва та експлуатації металевих димових труб, різноманітний хімічний склад газодимових сумішей багато аспектів прогнозування їхньої довговічності та раціонального розподілу ресурсів на поточні та капітальні ремонти залишаються невивченими.

Стаття підготовлена за матеріалами досліджень корозійного стану металевої димової труби, якою відводяться газу, утворювані технологічними процесами кольорової металургії [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Довговічність конструкцій і матеріалів розглядається різними кінетичними і статистичними теоріями. За флуктуаційною (кінетичною) теорією Журкова [3], матеріал деградує внаслідок розриву хімічних зв'язків у ньому під впливом теплових флуктуацій і напружень, а довговічність τ як час від прикладання навантаження до руйнування визначається рівнянням

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{V-\gamma\sigma}{RT}}, \quad (1)$$

де τ_0 – постійна, що для всіх матеріалів дорівнює 10^{12} – 10^{13} с;

V – енергія активації процесу розриву зв'язку;

γ – параметр, що враховує неоднорідність структури матеріалу та розподілу напруження;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура.

Застосування цього рівняння до металевих димових труб не є достатнім, оскільки воно не враховує корозійних процесів і зменшення перерізу конструкцій через них.

Питання довговічності металевих димових труб докладно вивчені в роботах [4, 5]: на основі положень теорії надійності розробляється фізико-статистичний метод оцінювання надійності елементів цих труб [4]; створюються загальна методологія оцінювання надійності та управління старінням елементів труб, методики визначення довговічності та залишкового ресурсу, пропонуються кінетичне рівняння довговічності та рівняння залишкового ресурсу [5]. Імовірність відмов і час їх досягнення розраховуються виходячи з емпіричних коефіцієнтів, які враховують процеси деградації елементів від корозії, пластичних деформацій тощо. Проте ці коефіцієнти мають узагальнений характер і в конкретних випадках їх слід уточнювати залежно від хімічного складу, температурно-вологісного режиму середовища тощо, які через технологічні процеси можуть бути дуже різноманітними [6-8].

Визначення мети та завдань дослідження. Мета досліджень – уточнення методики визначення залишкового ресурсу металевої димової труби електропечей кольорової металургії. Завдання досліджень: аналіз результатів натурного обстеження труби; оцінювання показників кінетики корозійного пошкодження; аналіз напружено-деформованого стану конструкції труби; прогноз остаточного ресурсу та рекомендація з його подовження.

Основна частина дослідження

Конструкція і поточний стан труби.

Досліджувана труба призначена для відведення газодимової суміші, що утворюється в електропечах під час плавлення мідного брухту. Труба циліндрична висотою 45 м, діаметром 1820 мм, з товщиною стінки 12 мм до висоти 28 м, 8 мм – верхніх 17 м, зварена з листової сталі марки С235, без футерування.

Зовнішній вигляд труби наведений на рис. 1. Труба відтяжок не має, у верхній частині має спіральні ребра, між позначками +7,76 і +9,49 – прямокутний виріз для під'єднання газоходу розміром 1730×950 мм (рис. 1, б). Встановлена на залізобетонному фундаменті (рис. 1, в) із бетону класу за міцністю С15/20, марки з морозостійкості F75, армованому сіткою 200×200Ø10A240 та закріплена за анкерні болти через

кронштейни зі сталі С235 товщиною 12 мм (рис. 1, з).

На момент обстеження труба експлуатувалася 20 років, з яких останні п'ять – після удосконалення процесу очищення газодимової суміші шляхом встановлення нових фільтрів. Стінки труби мають корозійні пошкодження по всій її довжині, знизу мінімальні, у верхній частині максимальні аж до наскрізних біля верхівки (рис. 2).



а



б



в



г

Рис. 1. Металева димова труба: а – загальний вигляд; б – врізання газоходу; г, д – кріплення до фундаменту

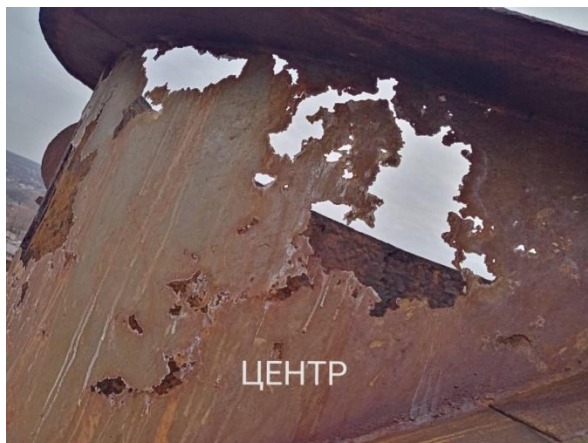


Рис. 2. Наскрізні корозійні ушкодження стінок верхівки труби

Методика прогнозу остаточного ресурсу труби. Виходячи з конструктивних особливостей і поточного стану труби за основу аналізу взяли швидкість корозії, мм/рік, зниженням міцності матеріалу за рахунок корозії зневажили. Запропонована така послідовність прогнозування залишкового ресурсу:

1) аналіз хімічного складу і температурно-вологісного режиму середовища (газодимової суміші) із визначенням ступеня агресивної дії і швидкості корозії, мм/рік;

2) вимірювання поточної товщини стінок труби, визначення глибини корозії, розрахунок швидкості корозії;

3) порівняння швидкості корозії, визначеної за ступенем агресивної дії середовища і за даними товщинометрії, обґрунтування величини швидкості корозії для прогнозування довговічності;

4) аналіз напружено-деформованого стану труби з урахуванням пошкоджень, визначення критичних зон із максимальними напруженнями і граничних величин товщини стінки, за яких настає відмова за несучою здатністю;

5) розрахунок часу, за який товщина стінки в критичній зоні досягне граничного значення, як остаточного ресурсу.

Аналіз швидкості корозії за ступенем агресивної дії середовища.

Характеристика середовища, що відводиться через трубу: джерела агресивних газів – ділянка вогневого рафінування міді, печі полум'яні, пост підігріву ковша, розливу металу, максимальні витрати викиду $V = 12,356 \text{ м}^3/\text{с}$. Оскільки точні дані про температурно-вологісний режим і склад середовища відсутні, показники концентрації потенційно агресивних речовин прийняті за встановленими величинами гранично допустимих концентрацій, вологісний (температурно-вологісний) режим – найбільш несприятливий.

Потенційно агресивні речовини за даними про гранично допустимі викиди: суспендовані тверді частинки, не диференційовані за складом – до $10 \text{ мг}/\text{м}^3$ або $m = 0,12356 \text{ г}/\text{с}$; оксид і діоксид азоту в перерахунку на діоксид азоту – до $m = 0,253298 \text{ г}/\text{с}$; оксид вуглецю – до $m = 0,262565 \text{ г}/\text{с}$. Розрахована за вказаними величинами витрат концентрація викидів у потоці середовища, що відводиться, $C = 1000m/V$ складає: діоксиду азоту NO_2 – $20,5 \text{ мг}/\text{м}^3$; діоксиду вуглецю CO_2 – $21,25 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Оскільки на поверхнях труби за перепаду температур можливе утворення конденсату, температура середовища в ній,

очевидно, перевищує $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, а відносна вологість перевищує 50% (продукти згоряння палив містять воду), вологісний режим середовища, за роботою [9], можна вважати вологим.

За цими характеристиками визначено ступінь агресивної дії середовища за роботою [9]. У разі середньорічної концентрації понад $0,3\text{ мг/м}^3$ агресивна дія твердих аерозолів (твердих частинок) має оцінюватись і враховуватись. Оскільки у твердих продуктах згоряння твердих палив часто містяться гідроксиди лужних металів, аналізований твердий аерозоль вважатимемо добре розчинним гігроскопічним. Ступінь дії добре розчинного гігроскопічного твердого аерозолу на металеву конструкцію, що експлуатується на відкритому повітрі у вологому режимі, – сильно агресивний.

Діоксид азоту NO_2 за концентрації $20,5\text{ мг/м}^3$ належить до групи газів С. Ступінь дії газу групи С на металеву конструкцію, що експлуатується на відкритому повітрі у вологому режимі, – сильно агресивний.

Діоксид вуглецю CO_2 за концентрації $21,25\text{ мг/м}^3$ належить до групи газів А. Ступінь дії газу групи А на металеву

конструкцію, що експлуатується на відкритому повітрі у вологому режимі, – середньо агресивний.

До зміни технологічного процесу очищення склад газоподібного середовища труби, очевидно, відповідав вказаному в первинному проєкті. Вміст кислих газів у попередній період експлуатації був вищий, ніж останні п'ять років, отже ступінь дії середовища міг досягати сильно агресивного впродовж усього терміну експлуатації труби.

Оцінено кінетику корозії за роботою [9]. Результати оцінювання наведено на рис. 3, з якого видно, що для сильно агресивної дії середовища (твердого аерозолу та газу діоксиду азоту NO_2) швидкість руйнування поверхневого шару незахищеної металеві конструкції може перевищити $0,5\text{ мм/р.}$, а зниження міцності в зоні корозії за рік перевищити 15% .

У випадку середньо агресивної дії середовища (фактичні показники викидів менші ГДК або режим середовища менш вологий до нормального) швидкість руйнування поверхневого шару незахищеної металеві конструкції може бути в межах $0,1\text{--}0,5\text{ мм/р.}$ (рис. 3), а зниження міцності в зоні корозії за рік – у межах $5\text{--}15\%$.

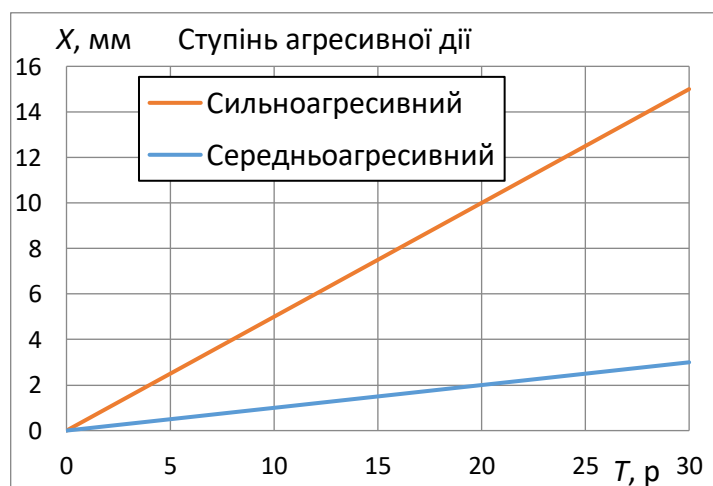


Рис. 3. Кінетика корозії (залежність глибини корозійного руйнування X , мм, від часу T , роки) незахищеної металеві конструкції за середньо агресивного та сильно агресивного ступеня дії середовища

Аналіз швидкості корозії за результатами товщинометрії. Результати вимірювань товщини стінки труби a по всій висоті наведені на рис. 4, *а*. Глибина корозійних пошкоджень, мм, по висоті (рис. 4, *б*) визначена в такий спосіб:

$$X = a_0 - a_t, \quad (2)$$

де a_0 і a_t – первинна і поточна товщина стінки відповідно.

Розподіл швидкості корозії, мм/р., по висоті (рис. 4, *в*) визначено як

$$v = X/T, \quad (3)$$

де T – тривалість експлуатації, 20 років.

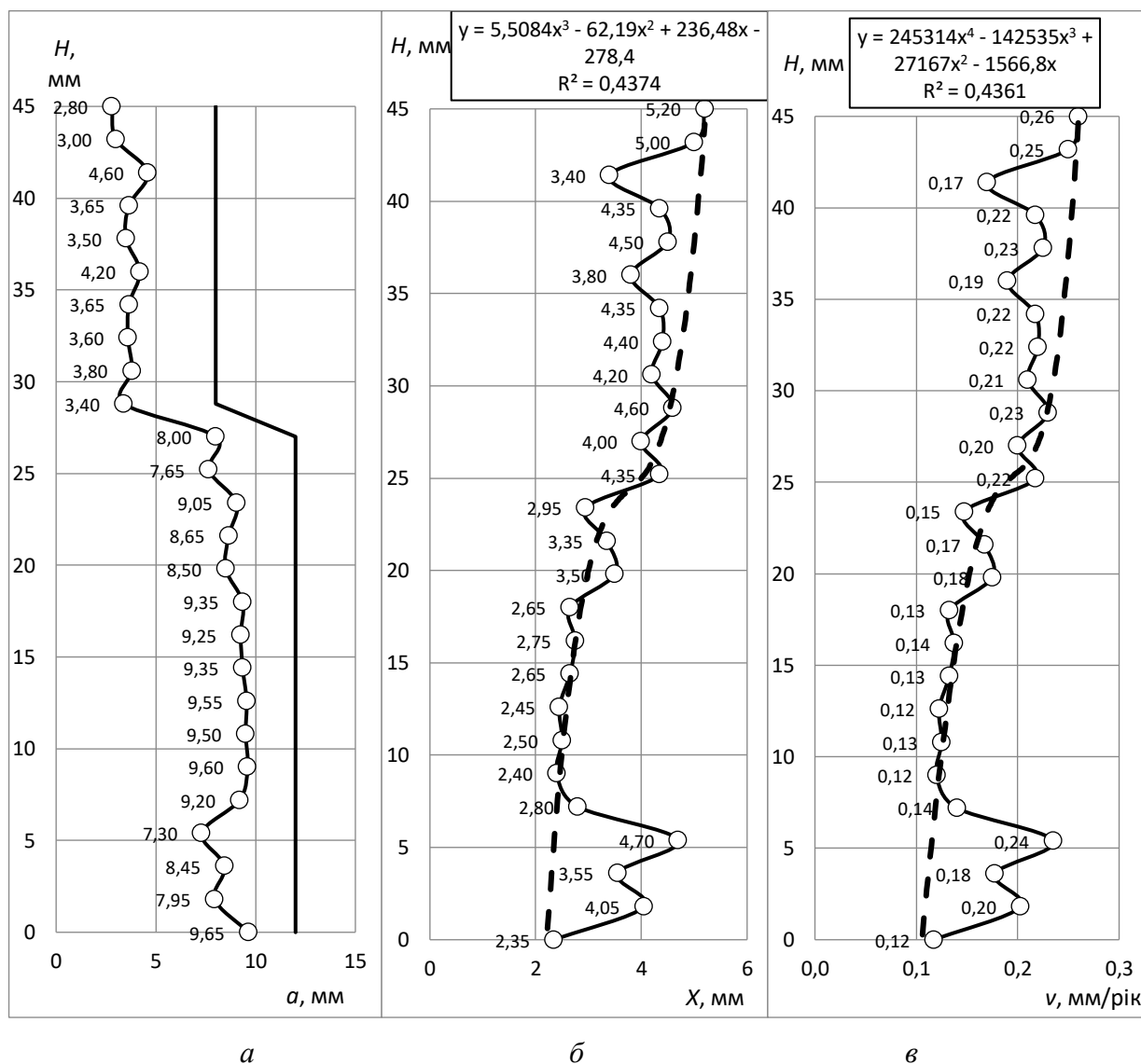


Рис. 4. Розподіл по висоті H :

а – первинної (суцільна лінія) і залишкової товщини стінки труби a ;
б – глибини корозійного ушкодження X ; *в* – швидкості корозії v

Аналіз конструктивних особливостей труби (рис. 1), характеру та глибини корозійних ушкоджень та швидкості корозії

(рис. 2, 4), показав, що її умовно можна поділити на три зони, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розподіл труби на зони корозії

Частина труби за висотою, м		Зона за інтенсивністю корозії	Глибина корозії X , мм	Швидкість корозії V , мм/р.
Верхня	25–45	Зона утворення конденсату і найбільш інтенсивної корозії	3,40–5,20	0,17–0,26
Середня	6–25	Добре вентильована зона найменш інтенсивної корозії над уводом димоходу	2,40–3,50	0,12–0,18
Нижня	0–6	Невентильована застійна зона корозії середньої інтенсивності нижче уводу димоходу	2,35–4,70	0,12–0,24

Із рис. 4 і табл. 1 видно, що фактичні показники швидкості корозії знаходяться в межах 0,1–0,5 мм, отже, ступінь агресивної дії відповідає середньо агресивному з деякими відмінами для різних зон по висоті труби.

Аналіз напружено-деформованого стану труби виконано з урахуванням корозійних пошкоджень, зокрема результатів товщинометрії, наведених на рис. 4. Розрахунки виконувалися методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу Ліра-САПР 2018 Pro (ліц. №1/6638). Розрахункова схема (рис. 5) складена з універсальних скінченних

елементів оболонки (для стовбура). Спіральні ребра у верхній частині не враховувались. Розрахунковий опір сталі марки С253 прийнято рівним 230 МПа.

Вихідні кліматичні дані для розрахунку, прийняті за дод. Е ДБН В.1.2-2:2006 для м. Запоріжжя: характеристичне значення вітрового тиску – 460 Па; характеристичне значення тиску вітру при ожеледі – 260 Па; характеристичне значення товщини ожеледі – 19 мм. Температурний режим експлуатації: $T_{вн} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{зовн} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Опис розрахункових комбінацій навантажень наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Розрахункові комбінації навантажень

Власна вага труби	Вітрове навантаження на трубу	Нерівномірний нагрів ($t_{вн} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{зовн} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Вітрове навантаження на трубу, вкриту ожеледдю	Вага ожеледі на стовбурі труби
+	+	–	–	–
+	+	+	–	–
+	–	–	+	+
+	–	+	+	+

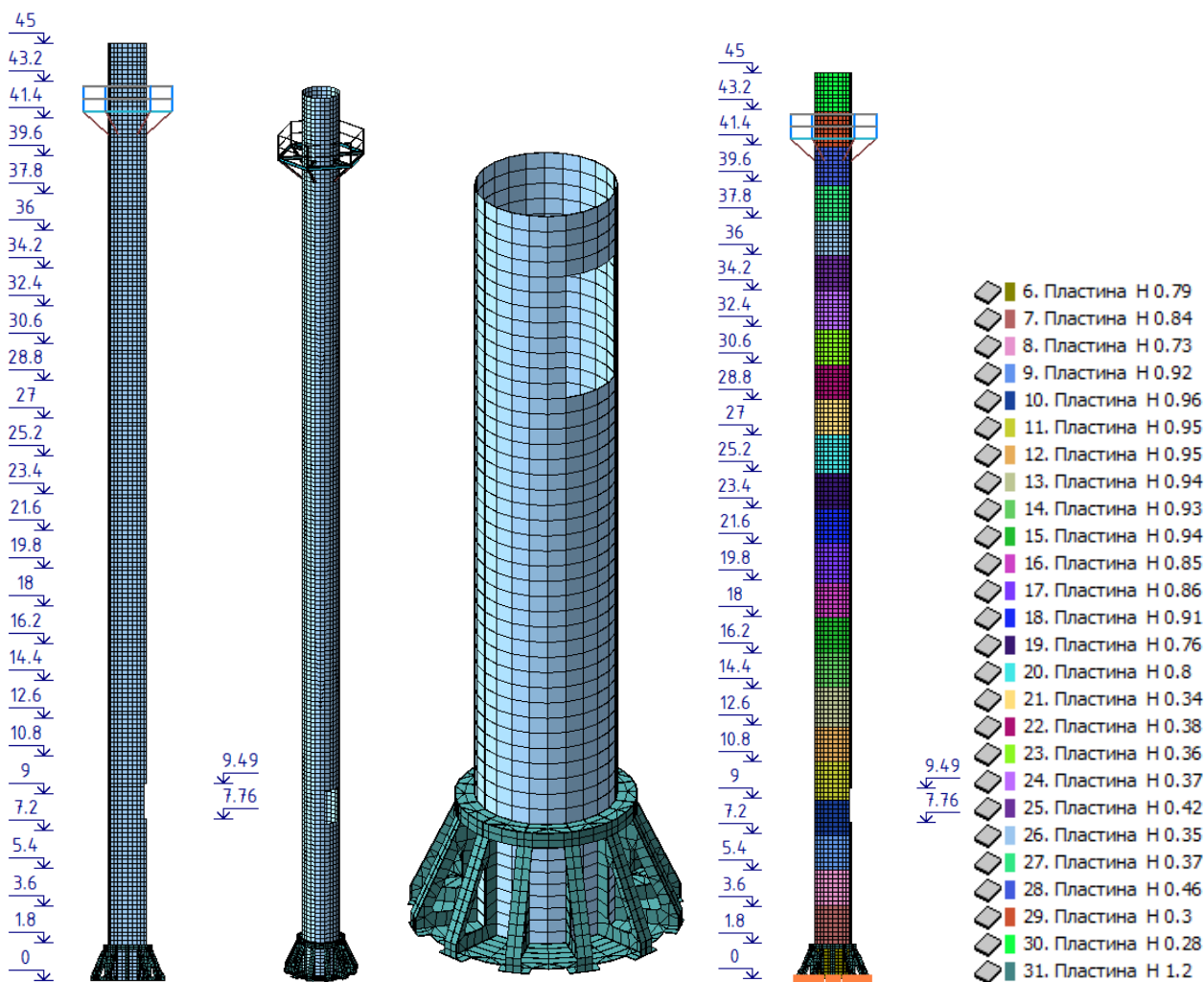


Рис. 5. Розрахункова схема

Отримані в результаті розрахунків поля напружень у стінках труби наведені на рис. 6, величини напружень у перерізах, для яких визначали товщину стінок труби, – у табл. 3.

Оцінювання несучої здатності і експлуатаційної надійності здійснено коефіцієнтами використання перерізів (коефіцієнтами вичерпання несучої здатності (табл. 3)) за методом граничних станів. Несуча здатність труби з урахуванням поточних даних товщинометрії забезпечується з

коефіцієнтом використання 0,65 за першою групою граничних станів (міцність) та 0,62 – за другою групою (жорсткість), максимальні відхилення становлять 280 мм.

Визначено також граничні значення товщини стінки $a_{гр}$ та глибини корозійного пошкодження $X_{гр}$ у перерізах, які забезпечують виконання умов щодо несучої здатності (табл. 3). Найбільш несприятливі значення $a_{гр}$ та $X_{гр}$ – 6,48 мм і 3,12 мм відзначаються в місці врізання газоходу (відмітка 9,0 м), яке є найбільш небезпечною зоною конструкції.

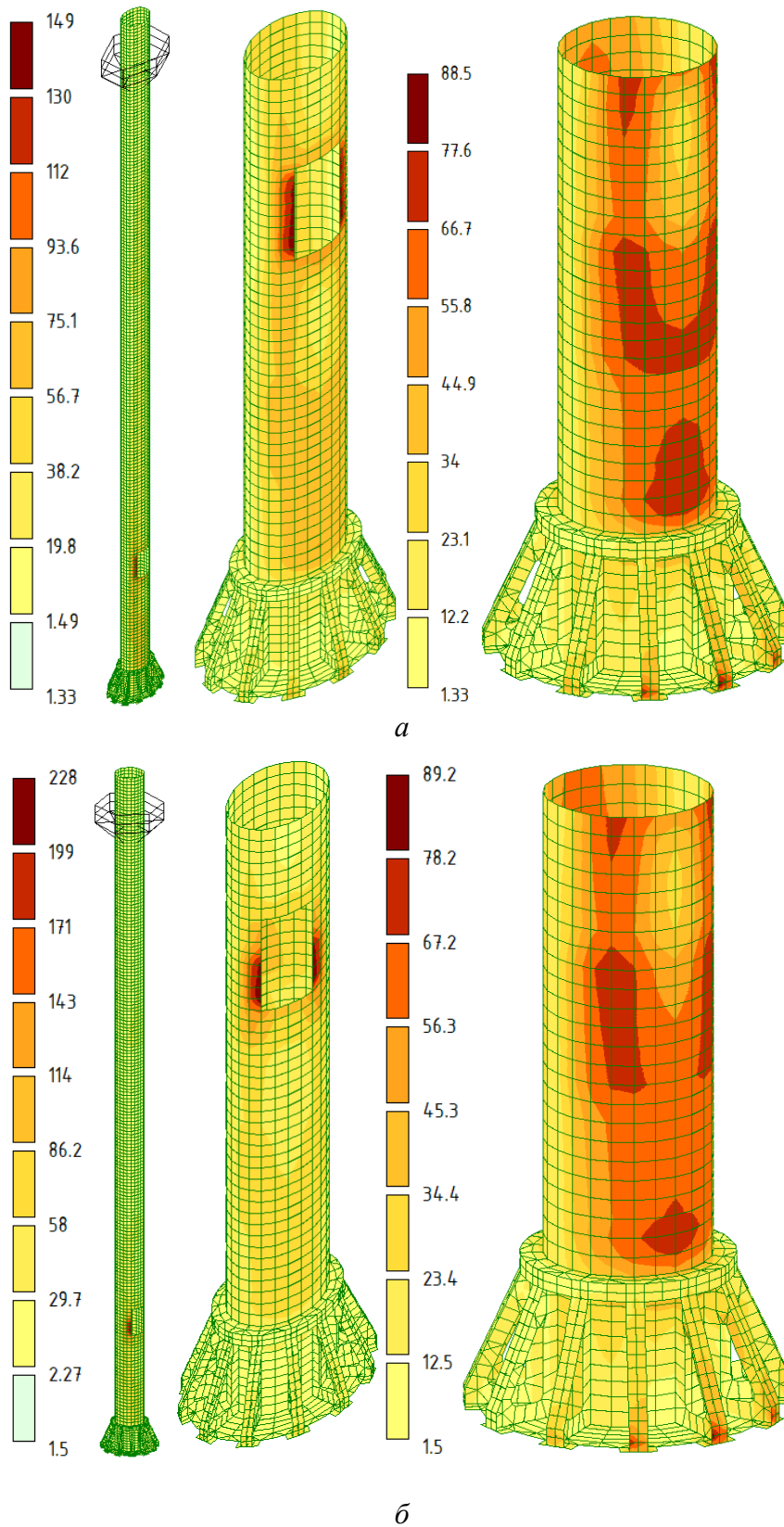


Рис. 6. Поля напружень у стінках труби, МПа: *a* – товщиною за товщинометрією (рис. 3);
б – зі зменшеною до граничного значення 6,48 мм товщиною в місці врізання газоходу

Таблиця 3

Результати розрахунку та часу досягнення граничного стану

Зона труби	$H, \text{ м}$	Поточна товщина стінки $a_t, \text{ мм}$	$V, \text{ мм/р.}$	Напруження, МПа	Коефіцієнт використання	Гранична величина за розрахунком, мм		Час досягнення граничного значення $t_{\text{гр}}$ роки
						товщини стінки $a_{\text{гр}}$	глибини пошкодження $X_{\text{гр}}$	
верхня	45,0	2,80	0,26	19	0,08	0,46	2,34	9,0
	43,2	3,00	0,25	26,4	0,11	0,51	2,49	10,0
	41,4	4,60	0,17	29,9	0,13	0,62	3,98	23,4
	39,6	3,65	0,22	20,2	0,09	0,54	3,11	14,1
	37,8	3,50	0,23	20,6	0,09	0,6	2,9	12,6
	36,0	4,20	0,19	22,9	0,1	0,67	3,53	18,6
	34,2	3,65	0,22	27,3	0,12	0,72	2,93	13,3
	32,4	3,60	0,21	30,5	0,13	0,76	2,84	13,5
	30,6	3,80	0,23	35,1	0,15	0,81	2,99	13,0
	28,8	3,40	0,20	40,3	0,18	0,88	2,52	12,6
середня	27,0	8,00	0,22	31,5	0,14	0,98	7,02	31,9
	25,2	7,65	0,15	25,5	0,11	1,17	6,48	43,2
	23,4	9,05	0,17	26,5	0,12	1,29	7,76	45,6
	21,6	8,65	0,18	32,6	0,14	1,36	7,29	40,5
	19,8	8,50	0,13	37,1	0,16	1,54	6,96	53,5
	18,0	9,35	0,13	38,8	0,17	1,7	7,65	58,8
	16,2	9,25	0,14	40,9	0,18	1,85	7,4	52,9
	14,4	9,35	0,13	42,9	0,19	1,96	7,39	56,8
	12,6	9,55	0,12	54,9	0,24	2,26	7,29	60,8
	10,8	9,50	0,13	139,8	0,61	6,28	3,22	24,8
	9,0	9,60	0,12	148,9	0,65	6,48	3,12	26,0
7,2	9,20	0,14	70,5	0,31	2,98	6,22	44,4	
нижня	5,4	7,30	0,24	86,6	0,38	3,04	4,26	17,8
	3,6	8,45	0,18	86,9	0,38	3,4	5,05	28,1
	1,8	7,95	0,20	60,8	0,26	2,58	5,37	26,9
	0	9,65	0,12	54,3	0,24	2,8	6,85	57,1

Розрахунок часу, за який товщина стінки в критичній зоні досягне граничного значення, для кожного виміряного перерізу труби:

$$T_{\text{гр}} = X_{\text{гр}} / v, \quad (4)$$

Результати розрахунку наведені в табл. 3 і на рис. 7, із якого видно, що в нижній, середній і верхній зонах труб на відмітках 5,4, 9 і 45 м граничний стан буде досягнуто через 17,8, 24,8 і 9 років, відповідно (рис. 8). Отже, без заходів із ремонту і захисту остаточний ресурс труби не перевищуватиме дев'яти років.

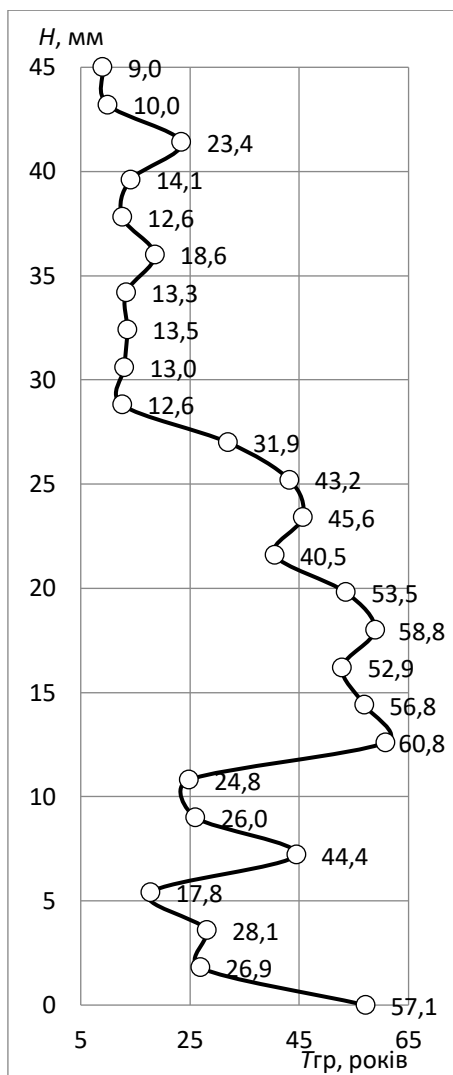


Рис. 7. Розподіл за висотою часу досягнення граничної величини глибини корозійного пошкодження конструкції труби $T_{гр}$

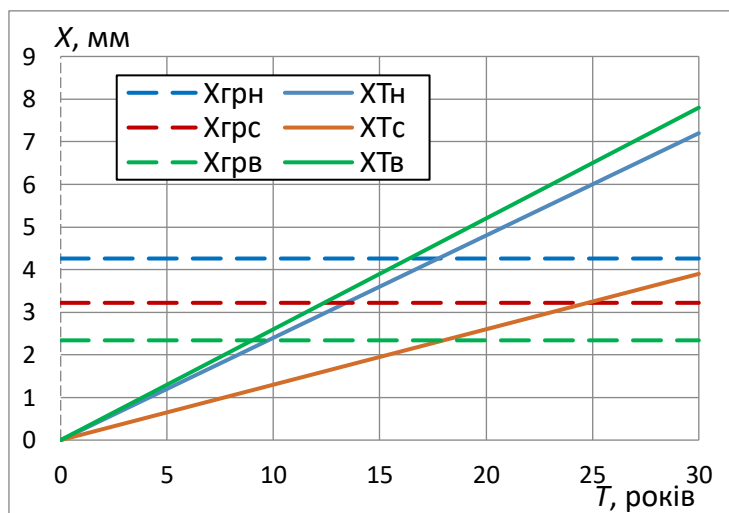


Рис. 8. Залежність від часу T глибини корозійного пошкодження конструкції труби в нижній $X_{Тн}$, середній $X_{Тс}$ і верхній $X_{Тв}$ зонах та граничні величини глибини корозійного пошкодження в нижній $X_{грн}$, середній $X_{грс}$ і верхній $X_{грв}$ зонах

Рекомендації з подовження ресурсу димової труби. Для подовження терміну служби труби рекомендовано такі заходи з ремонту і захисту від корозії:

- для збільшення остаточного ресурсу з 9 до 18 років рекомендовано замінити верхню частину труби з товщиною стінки 8 мм [10], а також виконати підсилення місця врізання димоходу; верхню частину труби виконати з вуглецевої сталі або корозійностійкої хромонікелевої сталі;

- збільшення остаточного ресурсу понад 18 років рекомендовано нанести на внутрішню поверхню і замінені і залишеної частини труби антикорозійне покриття, термін служби якого визначатиме величину цього збільшення; у разі виконання замінюваної частини труби з корозійностійкої хромонікелевої сталі антикорозійне покриття на цій частині не потрібне.

Як антикорозійне покриття рекомендовано кремнійорганічне чи епоксидне термостійке покриття IV групи товщиною 130 мм, нанесене у п'ять шарів (для епоксидного за умови забезпечення товщини кількість шарів допускається зменшити), або газотермічне напилення шару алюмінію товщиною 200–250 мм. За умови своєчасного відновлення антикорозійного покриття остаточний ресурс труби може бути доведений до показників довговічності залізобетонних та цегляних труб 70–80 років.

Висновки. Виконано комплексне дослідження корозійних процесів, пошкоджень і несучої здатності металеві димової труби висотою 45 м, що відводить газодимову суміш, утворювану в технологічних процесах кольорової металургії і розроблено методику прогнозування її остаточного ресурсу. У результаті аналізу складу і температурно-вологісного режиму зазначеної суміші встановлено, що вона є агресивним до сталі газоподібним середовищем і спричиняє корозію труби зсередини.

У результаті аналізу результатів замірів товщини стінки труби встановлено, що глибина корозійних ушкоджень за 20 років експлуатації досягла 2,35–5,2 мм, у верхівці труби до окремих наскрізних пошкоджень, швидкість корозії склала 0,12–0,26 мм/р., що відповідає середньо агресивному ступеню дії газоподібного середовища на вуглецеві сталі.

За інтенсивністю корозії труба поділяється на три умовні зони: нижня (від 0 до 6 м) – невентильована застійна зона корозії середньої інтенсивності нижче вводу димоходу (швидкість корозії 0,12–0,24 мм), середня (6–25 м) – добре вентильована зона менш інтенсивної корозії над вводом димоходу (0,12–0,18 мм/р.); верхня (25–45 м) – зона утворення конденсату та найбільш інтенсивної корозії (0,17–0,26 мм/р.).

Аналіз напружено-деформованого стану труби з урахуванням корозійних пошкоджень показав, що найбільш навантаженою небезпечною зоною конструкції є місце врізання горизонтального димоходу, а несуча здатність труби забезпечена з коефіцієнтом використання матеріалу 0,62–0,65. Визначено граничні значення товщини стінки та глибини корозійного пошкодження в перерізах, які забезпечують виконання умов до несучої здатності. Найбільш несприятливі значення 6,48 мм і 3,12 мм відповідно відзначаються на відмітці 9 м біля місця врізання димоходу.

Виходячи з величин швидкості корозії для всіх перерізів визначено час досягнення граничного стану. У нижній, середній і верхній зонах труб на відмітках 5,4, 9 і 45 м граничний стан буде досягнуто через 18, 25 і 9 років відповідно, отже, без заходів із ремонту і захисту остаточний ресурс труби не перевищує дев'яти років.

Для збільшення остаточного ресурсу труби до 18 років рекомендовано замінити верхню частину труби, а понад 18 років – здійснити захист внутрішньої поверхні термостійкою кремнійорганічною або епоксидною емаллю. Додаткове понад

18 років збільшення остаточного ресурсу дорівнюватиме терміну служби покриття. За умови своєчасного відновлення антикорозійного покриття остаточний

ресурс труби може бути доведений до показників довговічності залізобетонних та цегляних труб 70–80 років.

Список використаних джерел

1. Ельшин А. М. Дымовые трубы. Москва: Стройиздат, 2001. 296 с.
2. Оцінка впливу викидів на корозію металевої труби на Запорізькому заводі кольорових металів і розробка заходів із захисту від корозії: звіт з НДР за договором №17/0723. Харків: ТОВ «Харківбудндрпроект», 2023.
3. Основи теорії тверднення, міцності, руйнування і довговічності портландцементу, бетону і конструкцій із них. Т. 3. Теорія міцності, руйнування і довговічності бетону, залізобетону і конструкцій із них / А. М. Пługін, А. А. Пługін, О. А. Калінін та ін.; за ред. А. М. Пługіна. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/331533663_Fundamentals_of_the_theory_of_hardening_strength_destruction_and_durability_of_Portland_cement_concrete_and_structures_made_of_them_Vol3_Theory_of_strength_destruction_and_durability_of_concrete_reinf.
4. Яровий С. М., Слободянюк С. О., Титюк А. О. Фізико-статистичний метод оцінки надійності елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. *Науковий вісник будівництва*. 2019. № 2 (96). С. 264-269.
5. Serhii Yaroviy, Mykola Savytskyi, Serhii Slobodianiuk. Ensuring the reliability of metal smoke and veintilation pipes and their carrying towers. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 106 (2021) 176-200. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.176-200.
6. Fahrudin Kurniawan, Wawan Trisnadi, M. Munaji, Rizal Arifin. Investigasi mekanisme korosi pada pipa pemanas udara di Pabrik Gula Pagotan Madiun. *Turbo Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 10(1) 2021. DOI: 10.24127/trb.v10i1.1352.
7. Afrizal Vachlepi. Characterization of Iron Metal Corrosion in Liquid Smoke Coagulant. *Procedia Chemistry* 16 (2015) DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.073
8. Mengke Zhao, Jian Rui Feng, Qian Li, Jin Lin Corrosion behavior and failure mechanism of ball grid array packages in fire smoke atmospheres. *Engineering Failure Analysis*, February 2024. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107811.
9. Захист будівельних конструкцій та споруд від агресивних впливів / А. А. Пługін, І. Е. Казімагомедов, О. О. Скорик, Т. О. Костюк, О. Б. Деденьова, О. А. Калінін. Харків: УкрДУЗТ; ХНУБА, 2017. 188 с.
10. Жван В. Д., Доненко В. І., Антипенко Є. Ю. Технологія зведення спеціальних будівель та споруд. Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. 377 с.

Пługін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Жван Віктор Денисович, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID iD: 0009-0006-7593-1696.

Тел.: +38 (067) 570-05-16. E-mail: bud.nuzp@gmail.com.

Лобяк Олексій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9553-4245.

Тел.: +38 (057) 730-10-70. E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Назаренко Олексій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка».

ORCID iD: 0000-0003-3738-1129. Тел.: +38 (061) 769-85-03. E-mail: kafedra_bud@zp.edu.ua.

Микитась Сергій Валентинович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту.
E-mail: mikitass@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel. +38 (057) 730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Zhvan Viktor PhD (Tech). Professor of the Department of Development and Project Management, National University "Zaporizhzhia Polytechnic" of Ukraine ORCID iD: 0000-0002-2541-2066. Tel.: +38(061)7698503.

Тел.: +38 (067)5700516. E-mail: kafedra_bud@zp.edu.ua; viktor.zhvan@ukr.net

Lobiak Oleksii, PhD (Tech). Associate Professor, department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9553-4245. Тел.: +38 (057) 730-10-70.

E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Nazarenko Oleksiy Mykolayovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Development and Project Management, National University "Zaporizhzhya Politechnic". ORCID iD: 0000-0003-3738-1129. Tel.: +38 (066) 783-98-55. E-mail: bvup2021@ukr.net, alexnazar75.an@gmail.com

Mikitass Serhiy, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: mikitass@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 19.03.2024 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.454.2

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВИРОБНИЧОЇ СОБІВАРТОСТІ ДЕПОВСЬКОГО РЕМОНТУ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Доктори техн. наук Ю. Є. Калабухін, І. Е. Мартинов,
канд. техн. наук А. В. Труфанова, асп. С. І. Мартинов

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE COST OF THE DEPOT REPAIR OF PASSENGER CARS

Dr. Sc. (Tech.) Yu. Ye. Kalabukhin, Dr. Sc. (Tech.) I. E. Martynov,
PhD (Tech.) A. V. Trufanova, postgraduate student S. I. Martynov

***Анотація.** У статті розглянуто питання розроблення єдиного для відповідних структурних підрозділів Пасажирської компанії АТ «Укрзалізниця» науково-методичного підходу для визначення виробничої собівартості деповського ремонту пасажирських вагонів. Запропонована методика розрахунку собівартості ремонтних робіт у пасажирському господарстві базується на вимогах Положення (стандарту) бухгалтерського обліку 16 «Витрати» і дає змогу враховувати фактичний термін служби та рівень спрацювання пасажирського вагона, його тип і конструктивні особливості.*

***Ключові слова:** суцільнометалевий пасажирський вагон, деповський ремонт, розрахунковий вагон, собівартість, калькуляція, види витрат.*

***Abstract.** The vast majority of passenger cars owned by Ukrzaliznytsia JSC have been in operation for more than 30 years. These cars have practically exhausted their service life. The supply of new cars is minimal. Therefore, carrying out restoration repairs of passenger cars remains the most important way to maintain their performance.*

When cars are received for repair, they have different physical wear and tear. That is, some of the cars have an underutilized resource, and the other part has an increased level of wear. And if in the first case, repair costs may be unreasonably high, then in the second case, even with additional costs, it is difficult to ensure the necessary technical condition of such cars.

Currently, there is a method for calculating the cost of repairing passenger cars. It is based on actual accounting data for the previous period, taking into account the inflation factor. To effectively plan financial resources for subsequent periods and optimize the overall costs of materials and spare parts during depot repairs of passenger cars, a methodology for determining production costs is required that would take into account all the above factors.

A scientific and methodological approach to determining the cost of depot repairs of passenger cars is proposed. It is based on a comprehensive analysis of expenses that affect the cost of depot repairs. A unified procedure for determining the current costs of its implementation is recommended.

The issues of determining the scope of repair of passenger cars, taking into account the service life and design features of the cars, are considered.

The production costs per unit of depot repair of a passenger car during the main and auxiliary production are analyzed. At the same time, the fuel and electricity consumption for the given car is taken into account. The procedure for distributing annual overhead costs for a specific passenger car of a certain type has been determined.

The proposed scientific and methodological approach to determining production costs will ensure effective planning of production activities of enterprises for the repair of passenger cars.

Keywords: *all-metal passenger car, depot repairs, settlement car, cost, calculation, types of expenses.*

Вступ. Переважна більшість пасажирських вагонів власності АТ «Укрзалізниця» експлуатується вже понад 30 років і практично вичерпала свій ресурс. Це стосується як технічного стану металоконструкцій кузова та рами, так і систем життєзабезпечення. Рівень зношеності вагонів перевищує 90 %. Старіння вагонів продовжується швидкими темпами і не компенсується надходженням нових вагонів. При виведенні вагонів у ремонт їхнє фізичне спрацювання неоднакове, що призводить до подачі в ремонт вагонів як із ресурсом, використаним неповністю, так і підвищеним ступенем спрацювання. І якщо в першому випадку витрати на ремонт можуть бути необґрунтовано завищені, то в другому випадку навіть при додаткових витратах важко гарантувати безпеку експлуатації таких вагонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] досліджено сучасні підходи щодо обліку експлуатаційних витрат підприємств залізничного транспорту.

У дослідженні [2] проаналізовано шляхи зниження експлуатаційних витрат залізниць України в умовах реформування залізничного транспорту.

У роботі [3] доведено, що для підприємств залізничного транспорту характерна низька ефективність системи управління витратами, неналежна дієвість і прозорість механізмів їхнього контролю та моніторингу. Вказано, що на сучасному етапі слід забезпечити цифровізацію інформаційних потоків за управління витратами з метою формування ефективної

інформаційної системи управління витратами залізничного транспорту.

Безпосередньо питання управління витратами залізничного транспорту розкрито в наукових публікаціях таких вчених, як О. Топоркова, М. Сергієнко, О. Железняк та ін. [4-6].

Дослідженням питань формування, обліку і розподілу експлуатаційних витрат присвячено ряд статей [7-10]. Серед авторів слід відзначити сучасних вітчизняних науковців, які займаються новітніми дослідженнями питань обліку витрат у галузі: М. В. Макаренко [7], Б. О. Шумляєв [8], Л. І. Боїла [10]. Авторами зазначається, що одним з найбільш актуальних є питання складу виробничих витрат, пов'язаних з перевезенням, а саме експлуатаційних витрат.

Очевидно, що на сьогодні при плануванні витрат на ремонт пасажирських вагонів використовують методику розрахунку собівартості ремонтних робіт на підставі фактичних даних бухгалтерського обліку за попередній період з урахуванням коефіцієнта інфляції. Така методика розрахунку може призвести до втрати значного переліку необхідних для ремонту матеріалів і запасних частин (оскільки через відсутність нових у попередньому періоді були встановлені відремонтовані та відновлені). Тобто існує потреба в розробленні методики визначення собівартості деповського ремонту пасажирських вагонів з урахуванням технічно обґрунтованих норм витрат матеріалів і трудових витрат залежно від типу вагона, терміну експлуатації та рівня спрацювання.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є створення єдиного для відповідних структурних підрозділів Пасажирської компанії АТ «Укрзалізниця» науково-методичного підходу для визначення виробничої собівартості деповського ремонту пасажирських вагонів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати чинники, які обумовлюють собівартість деповського ремонту пасажирського вагона;

- запропонувати науково-методичний підхід для визначення виробничої собівартості деповського ремонту пасажирських вагонів з урахуванням їхніх конструктивних особливостей, фактичного терміну служби та рівня спрацювання.

Основна частина дослідження.

Основу парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця» складають вагони, середній вік яких перевищує 29 років, а рівень спрацювання перевищує 90 %. Старіння вагонів продовжується швидкими темпами і не компенсується надходженням нових вагонів. Кількісний дефіцит пасажирських вагонів посилюється незадовільним технічним станом наявного парку. Через обмеженість придбання нових вагонів АТ «Укрзалізниця» вимушена проводити технічне обстеження вагонів з метою подовження нормативного терміну служби. Але пасажирські вагони, на відміну від вантажних, приписані до певної вагонної дільниці та зазвичай експлуатуються на відомих маршрутах. А умови експлуатації на різних залізницях суттєво відрізняються. У результаті вагони одного виробника та навіть одного року виготовлення можуть мати різний рівень зносу. Тобто для ефективного планування фінансових ресурсів на наступні періоди та оптимізації загальних витрат матеріалів, запасних частин під час деповського ремонту (ДР) пасажирських вагонів в умовах виробничих підрозділів філії «Пасажирська компанія» необхідна методика визначення виробничої

собівартості, яка б урахувала всі зазначені вище чинники.

Показник «виробнича собівартість» ремонту вагонів є одним із основних економічних показників вагоноремонтного підприємства. Собівартість може використовуватися в бухгалтерському, статистичному або управлінському обліку. Але методика розрахунку собівартості повинна мати однозначне тлумачення незалежно від того, де буде використовуватися цей показник.

Метою планування собівартості є економічно обґрунтоване визначення величини витрат, необхідних для проведення кожного виду ремонту. Розрахунки планової собівартості окремих видів ремонту пасажирських вагонів мають використовуватися для визначення потреби в оборотних коштах, визначення економічної ефективності окремих організаційно-технічних заходів, а в подальшому також для планування прибутку і формування цін.

Загальна сума витрат на ремонт залежить від обсягу ремонту в конкретному депо. Обсяг ремонту пасажирських вагонів за типами визначається як за кількістю фізичних вагонів i -го типу, так і у приведених вагонах з урахуванням терміну експлуатації за формулою

$$N_{пр,і,t}^{ДР} = N_{фіз,і,t}^{ДР} \times k_{пр,і,t}^{ДР}, \quad (1)$$

де $N_{фіз,і,t}^{ДР}$ – кількість пасажирських вагонів i -го типу з терміном експлуатації t , відремонтованих в обсязі деповського ремонту, фіз. ваг;

$k_{пр,і,t}^{ДР}$ – сумарний коефіцієнт приведення з урахуванням терміну експлуатації t .

При розрахунку обсягу ремонту вагонів у депо необхідно враховувати, купейний це вагон або жорсткий вагон відкритого типу, наявність водяного або електричного опалення, термін експлуатації та інші конструктивні особливості. Тому всі вагони, що надходять у ремонт, приводяться

до так званого «приведеного» вагона. Для визначення обсягу ремонту пасажирських вагонів у приведених вагонах за розрахунковий вагон приймаємо суцільнометалевий пасажирський вагон із водяним опаленням і без кондиціонування повітря.

Сумарний коефіцієнт приведення за видом ремонту з урахуванням терміну експлуатації t визначається як

$$k_{\text{пр},t}^{\text{ДР}} = k_c \times k_c^{\text{ДР}} \times k_t^{\text{ДР}}, \quad (2)$$

де k_c – коефіцієнт приведення залежно від типу пасажирського вагона, виду опалення та наявності кондиціонування повітря;

$k_c^{\text{ДР}}$ – коефіцієнт приведення залежно від типу пасажирського вагона;

$k_t^{\text{ДР}}$ – коефіцієнт приведення залежно від терміну експлуатації пасажирського вагона та виду ремонту.

Річний обсяг ремонту пасажирських вагонів з урахуванням терміну експлуатації за деповським ремонтом у приведених вагонах визначається за формулою

$$N_{\text{р.пр}}^{\text{ДР}} = \sum_t \sum_i N_{\text{пр},t}^{\text{ДР}} = \sum_t \sum_i (N_{\text{фіз},t}^{\text{ДР}} \times k_{\text{пр},t}^{\text{ДР}}). \quad (3)$$

Наступним етапом є визначення витрат на деповський ремонт. Загальновиробничі витрати являють собою витрати на організацію виробництва та управління основними виробничими цехами, дільницями, бригадами та іншими підрозділами, а також витрати на утримання та експлуатацію машин і устаткування. До допоміжних виробництв належать роботи з ремонту колісних пар і редукторно-карданних приводів, ремонту і виготовлення деталей і запасних частин пасажирських вагонів.

За деповського ремонту до прямих витрат належать такі витрати:

- на оплату праці працівників і бригадирів, зайнятих деповським ремонтом;
- відратування на соціальні заходи;
- на запасні частини та матеріали, що були використані при деповському ремонті;
- паливо;
- електроенергію;
- оплата тарифу та інші витрати, пов'язані з транспортуванням пасажирських вагонів у ремонт і з ремонту;
- інші витрати.

Очевидно, що величина прямих витрат залежить від рівня технічного стану вагона, що надійшов у ремонт. Тобто витрати

запасних частин, матеріалів, електроенергії тощо зростають при збільшенні спрацювання конструктивних елементів вагона, які підлягають відновленню.

Загальновиробничі витрати поділяються на постійні та змінні. Перелік і склад постійних і змінних загальновиробничих витрат встановлюються підприємством.

Прямі виробничі витрати основного виробництва на матеріали на одиницю деповського ремонту визначається за формулою

$$B_{\text{м.о.в}}^{\text{ДР}} = \sum_{i=1}^m (M_{\text{о.в},i}^{\text{ДР}} \times \Pi_{\text{м},i}), \quad (4)$$

де $M_{\text{о.в},i}^{\text{ДР}}$ – витрати матеріалу i -го найменування з основного виробництва на одиницю деповського ремонту, од.;

$\Pi_{\text{м},i}$ – ціна за одиницю матеріалу i -го найменування, грн;

m – кількість найменувань матеріалів з основного виробництва, які витрачаються на одиницю деповського ремонту.

Прямі виробничі витрати основного виробництва на запасні частини на одиницю деповського ремонту визначаються за формулою

$$B_{зч}^{ДР} = \sum_{i=1}^{z} (ЗЧ_i^{ДР} \times Ц_{зч_i}), \quad (5)$$

де $ЗЧ_i^{ДР}$ – витрати запасних частин i -го найменування з основного виробництва на одиницю деповського ремонту, од.;

$Ц_{зч_i}$ – ціна за одиницю запасної частини i -го найменування, грн;

z – кількість найменувань запасних частин з основного виробництва, які витрачаються на одиницю деповського ремонту.

Вартість зворотних відходів основного виробництва, що вираховується з загальної суми матеріальних витрат, віднесеної на одиницю деповського ремонту, визначається за формулою

$$B_{звх}^{ДР} = \sum_{i=1}^{v} (ЗВХ_i^{ДР} \times Ц_{звх_i}), \quad (6)$$

де $ЗВХ_i^{ДР}$ – кількість зворотних відходів i -го найменування з основного виробництва, що утворюються на одиниці деповського ремонту, од.;

$Ц_{звх_i}$ – ціна за одиницю зворотних відходів i -го найменування, грн;

v – кількість найменувань зворотних відходів, що утворюються на одиниці деповського ремонту.

Прямі виробничі витрати основного виробництва на матеріали та запасні

частини з урахуванням зворотних відходів на одиницю деповського ремонту визначаються за формулою

$$B_M^{ДР} = B_{м.о.в}^{ДР} + B_{зч}^{ДР} - B_{звх}^{ДР}, \quad (7)$$

Однією з основних статей витрат при ремонті є витрати на основну та додаткову заробітну плату. Прямі виробничі витрати основного виробництва на основну заробітну плату виробничим працівникам на одиницю деповського ремонту визначаються за формулою

$$B_{озп.о.в}^{ДР} = \sum_{i=1}^{o} (ht_i^{ДР} \times \overline{ГТС}_i), \quad (8)$$

де $ht_i^{ДР}$ – трудомісткість технологічної операції i -го найменування з основного виробництва на одиницю деповського ремонту з урахуванням терміну експлуатації, норм. год.;

$\overline{ГТС}_i$ – годинна тарифна ставка, яка відповідає середньому розряду роботи з виконання технологічної операції i -го найменування, грн;

o – кількість найменувань технологічних операцій з основного виробництва одиниці деповського ремонту.

Годинна тарифна ставка, яка відповідає середньому розряду роботи, визначається за формулою

$$\overline{ГТС}_i = ГТС_j + (ГТС_{j+1} - ГТС_j) \times (\bar{j} - j), \quad (9)$$

де \bar{j} – середній розряд роботи;

j – розряд менший цілий, що передує середньому;

$j + 1$ – розряд більший цілий після середнього;

$ГТС_j$ – годинна тарифна ставка за j -м розрядом, грн;

$ГТС_{j+1}$ – годинна тарифна ставка за $(j+1)$ -м розрядом, грн.

Трудомісткість технологічної операції i -го найменування з основного виробництва на одиницю деповського ремонту з урахуванням терміну експлуатації визначається за формулою

$$ht_i^{ДР} = k_c^{ДР} \times k_{t_i}^{ДР} \times ht_{H_i}^{ДР}, \quad (10)$$

де k_c^{DP} – коефіцієнт приведення трудомісткості деповського ремонту до капітального ремонту;

$k_{t_i}^{DP}$ – коефіцієнт, який ураховує підвищення трудомісткості технологічної операції i -го найменування залежно від терміну експлуатації пасажирського вагона;

$ht_{H_i}^{DP}$ – нормативна трудомісткість технологічної операції i -го найменування, норм. год.

Прямі виробничі витрати основного виробництва на додаткову заробітну плату виробничим працівникам на одиницю деповського ремонту визначаються за формулою

$$B_{дзп}^{DP} = \frac{H_{дзп} \times B_{озп.о.в}^{DP}}{100}, \quad (11)$$

де $H_{дзп}$ – відсоток додаткової заробітної плати, %.

Прямі виробничі витрати основного виробництва на відрахування на соціальні заходи визначаються за формулою

$$B_{сз}^{DP} = \frac{(B_{озп.о.в}^{DP} + B_{дзп}^{DP}) \times H_{зп}}{100}, \quad (12)$$

де $H_{зп}$ – відсоток нарахувань на заробітну плату, %.

Прямі виробничі витрати основного виробництва на електроенергію на одиницю деповського ремонту визначаються за формулою

$$B_e^{DP} = \sum_{i=1}^{i=o} \sum_{j=1}^{j=k} (W_{i,j}^{DP} \times t_{i,j}^{DP} \times C_e), \quad (13)$$

де $W_{i,j}^{DP}$ – потужність електричного обладнання j -го найменування, яке використовується для здійснення технологічної операції i -го найменування з основного виробництва одиниці деповського ремонту, кВт;

$t_{i,j}^{DP}$ – час роботи електричного обладнання j -го найменування на технологічній операції i -го найменування з основного виробництва одиниці деповського ремонту, год;

C_e – ціна 1 кВт·год, грн;

k – кількість найменувань електричного обладнання, яке використовується для здійснення технологічної операції i -го найменування з основного виробництва одиниці деповського ремонту;

o – кількість найменувань технологічних операцій з основного виробництва одиниці деповського ремонту.

Прямі виробничі витрати основного виробництва на паливо на одиницю деповського ремонту визначаються за формулою

$$B_{п}^{DP} = H_{п.р.} \times C_{п.р.} + \sum_{j=1}^{j=p} (G_j \times C_{пj} \times D^{DP}), \quad (14)$$

де G_j – добові витрати палива j -го найменування з основного виробництва, що витрачаються на одиницю деповського ремонту, од.;

$C_{пj}$ – ціна за одиницю палива j -го найменування, грн;

$H_{п.р.}$ – норма витрат палива на розпалювання, кг;

$C_{п.р.}$ – ціна за одиницю палива для розпалювання, грн;

D^{DP} – кількість днів простою пасажирського вагона на деповському ремонті, дні;

p – кількість найменувань палива, яке витрачається на одиницю деповського ремонту.

До прямих виробничих витрат основного виробництва за статтею «Інші» належать прямі виробничі витрати, які безпосередньо пов'язані з технологією проведення деповського ремонту і не були віднесені до попередніх статей.

Для обліку витрат на послуги допоміжних виробництв рекомендовано використовувати позаомовний метод.

Прямі виробничі витрати допоміжного виробництва на матеріали на одиницю «замовлення №» визначаються за формулою

$$B_{м.д.в}^{№} = \sum_{i=1}^{i=m} (M_i^{№} \times C_{m_i}), \quad (15)$$

де $M_i^{№}$ – витрати матеріалу i -го найменування на одиницю «замовлення №», од.;

C_{m_i} – ціна за одиницю матеріалу i -го найменування, грн;

m – кількість найменувань матеріалів, які витрачаються на одиницю «замовлення №».

Прямі виробничі витрати допоміжного виробництва на запасні частини на одиницю «замовлення №» визначаються за формулою

$$B_{зч}^{№} = \sum_{i=1}^{i=z} (ЗЧ_i^{№} \times C_{зч_i}), \quad (16)$$

де $ЗЧ_i^{№}$ – витрати запасних частин i -го найменування на одиницю «замовлення №», од.;

$C_{зч_i}$ – ціна за одиницю запасної частини i -го найменування, грн;

z – кількість найменувань запасних частин, які витрачаються на одиницю «замовлення №».

Вартість зворотних відходів допоміжного виробництва, що вираховується з загальної суми матеріальних витрат, віднесеної на одиницю «замовлення №», визначається за формулою

$$B_{звх}^{№} = \sum_{i=1}^{i=v} (ЗВХ_i^{№} \times C_{звх_i}), \quad (17)$$

де $ЗВХ_i^{№}$ – кількість зворотних відходів i -го найменування, що утворюються на одиниці «замовлення №», од.;

$C_{звх_i}$ – ціна за одиницю зворотних відходів i -го найменування, грн;

v – кількість найменувань зворотних відходів, що утворюються на одиниці «замовлення №».

Прямі виробничі витрати допоміжного виробництва на матеріали та запасні частини з урахуванням зворотних відходів на одиницю «замовлення №» визначаються за формулою

$$B_M^{№} = B_{м.д.в}^{№} + B_{зч}^{№} - B_{звх}^{№}. \quad (18)$$

Прямі виробничі витрати на основну заробітну плату виробничим працівникам з допоміжного виробництва на одиницю «замовлення №» визначаються за формулою

$$B_{озн}^{№} = ht_{д.в.}^{№} \times \overline{ГТС}_{д.в.}^{№}. \quad (19)$$

де $ht_{д.в.}^{№}$ – нормативна трудомісткість робіт на одиницю «замовлення №», норм. год;

$\overline{ГТС}_{д.в.}^{№}$ – годинна тарифна ставка, яка відповідає середньому розряду роботи для виконання «замовлення №», грн.

Прямі виробничі витрати на додаткову заробітну плату виробничим працівникам з допоміжного виробництва на одиницю «замовлення №» визначаються за формулою

$$B_{дзн}^{№} = \frac{H_{дзн} \times B_{озн}^{№}}{100}, \quad (20)$$

де $H_{дзн}$ – відсоток додаткової заробітної плати, %.

Прямі виробничі витрати на відрахування на соціальні заходи визначаються за формулою

$$B_{сз}^{№} = \frac{(B_{озн}^{№} + B_{дзн}^{№}) \times H_{зп}}{100}, \quad (21)$$

де H_{zn} – відсоток нарахувань на заробітну плату, %.

Прямі виробничі витрати допоміжного виробництва на електроенергію на одиницю «замовлення №» визначаються за формулою

$$B_e^{№} = \sum_{i=1}^{i=0} \sum_{j=1}^{j=k} (W_{i,j}^{№} \times t_{i,j}^{№} \times C_e), \quad (22)$$

де $W_{i,j}^{№}$ – потужність електричного обладнання j -го найменування, яке використовується для здійснення технологічної операції i -го найменування одиниці «замовлення №», кВт;

$t_{i,j}^{№}$ – час роботи електричного обладнання j -го найменування на технологічній операції i -го найменування одиниці «замовлення №», год;

C_e – ціна 1 кВт·год, грн;

k – кількість найменувань електричного обладнання, яке використовується для здійснення технологічної операції i -го найменування одиниці «замовлення №»;

o – кількість найменувань технологічних операцій одиниці «замовлення №».

Прямі виробничі витрати допоміжного виробництва на паливо на одиницю «замовлення №» визначаються за формулою

$$B_n^{№} = H_n^{№} \times C_n, \quad (23)$$

де $H_n^{№}$ – норма витрат палива на одиницю «замовлення №», од.;

$C_{n.p.}$ – ціна за одиницю палива, грн.

Річні постійні загальновиробничі витрати за об'єктами калькулювання (деповський ремонт) визначаються за формулою

$$PB_{пзв}^{ДР} = PB_{пзв} \times \gamma_{ДР}. \quad (26)$$

До прямих виробничих витрат допоміжного виробництва за статтею «Інші» ($B_{ін}^{№}$) мають бути віднесені прямі виробничі витрати, які безпосередньо пов'язані з технологією виробництва «замовлення №» і не були віднесені до попередніх статей.

Річні прямі виробничі витрати на деповський ремонт пасажирських вагонів визначаються сумуванням прямих виробничих витрат основного та допоміжного виробництва на ремонт кожного окремого пасажирського вагона c -го типу, відремонтованого протягом року, за формулою

$$PB_{пзв}^{ДР} = \sum_c B_{пзв,c}^{ДР}. \quad (24)$$

Загальновиробничі витрати мають складатися з таких елементів витрат:

- оплата праці;
- відрахування на соціальні заходи;
- матеріали;
- паливо;
- електроенергія;
- амортизація;
- інші.

Базою розподілу річних загальновиробничих витрат за об'єктами калькулювання (видами ремонту) є витрати на заробітну плату виробничим працівникам за видами ремонту: $PB_{zn}^{ДР}, PB_{zn}^{KP-1}, PB_{zn}^{KP-2}, PB_{zn}^{KBP}$.

Питома вага бази розподілу за об'єктами калькулювання (деповський ремонт) визначається за формулою

$$\gamma_{ДР} = \frac{PB_{zn}^{ДР}}{PB_{zn}} = \frac{PB_{zn}^{ДР}}{PB_{zn}^{ДР} + PB_{zn}^{KP-1} + PB_{zn}^{KP-2} + PB_{zn}^{KBP}}. \quad (25)$$

Річні змінні загальновиробничі витрати за об'єктами калькулювання (деповський) визначаються за формулою

$$PB_{ззв}^{ДР} = PB_{ззв} \times \gamma_{ДР}. \quad (27)$$

Розподіл загальновиробничих витрат на одиницю ремонту конкретного вагона здійснюється пропорційно витратам на основну заробітну плату виробничим працівникам, задіяним для виконання ремонту конкретного пасажирського вагона c -го типу.

Порядок розподілу річних загальновиробничих витрат на конкретний пасажирський вагон c -го типу такий.

Питома вага витрат на заробітну плату працівників, задіяних на деповському ремонті конкретного вагона, за об'єктами калькулювання визначається за формулою

$$\beta_c^{DP} = \frac{V_{zn_c}^{DP}}{PV_{zn_c}^{DP}} = \frac{V_{zn_c}^{DP}}{V_{zn_1}^{DP} + V_{zn_2}^{DP} + \dots + V_{zn_c}^{DP}}, \quad (28)$$

де $V_{zn_1}^{DP}, V_{zn_2}^{DP}, \dots, V_{zn_c}^{DP}$ – витрати на заробітну плату виробничим працівникам, які здійснили деповський ремонт пасажирського вагона відповідно 1, 2, ..., c .

Постійні загальновиробничі витрати на одиницю деповського ремонту пасажирського вагона c -го типу за об'єктами калькулювання визначаються за формулою

$$b_{пзв_c}^{DP} = PV_{пзв}^{DP} \times \beta_c^{DP} = PV_{пзв} \times \gamma_{DP} \times \beta_c^{DP}. \quad (29)$$

Змінні загальновиробничі витрати на одиницю деповського ремонту пасажирського вагона c -го типу за

об'єктами калькулювання визначаються за формулою

$$b_{ззв_c}^{DP} = PV_{ззв}^{DP} \times \beta_c^{DP} = PV_{ззв} \times \gamma_{DP} \times \beta_c^{DP}. \quad (30)$$

Загальновиробничі витрати на одиницю деповського ремонту пасажирського вагона c -го типу за об'єктами калькулювання (деповський ремонт) визначаються за формулою

$$b_{зв_c}^{DP} = b_{ззв_c}^{DP} + b_{пзв_c}^{DP}. \quad (31)$$

Калькуляція виробничої собівартості деповського ремонту пасажирського вагона c -го типу складається за результатами розрахунку прямих виробничих витрат основного виробництва, допоміжного виробництва та загальновиробничих витрат.

Висновки:

- показано, що собівартість деповського ремонту пасажирського вагона обумовлюється рядом чинників, таких як термін експлуатації і технічний стан вагона, обсяг і види ремонтних робіт, вартість матеріалів і комплектуючих. Виконаний аналіз чинників дає можливість визначити оптимальні напрями для зниження собівартості деповського ремонту пасажирського вагона;

- науково-методичний підхід щодо визначення виробничої собівартості деповського ремонту пасажирських вагонів, який запропоновано, дає змогу встановити єдиний порядок визначення поточних

витрат на його проведення з урахуванням фактичного терміну служби,

конструктивних особливостей і рівня спрацювання пасажирських вагонів.

Список використаних джерел

1. Кірдіна О. Г., Коловойда Н. В., Шамрай А. Є. Підходи до обліку експлуатаційних витрат підприємств залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2019. № 68. С. 279-288.
2. Зоріна О. І. Шляхи зниження експлуатаційних витрат залізниць України в умовах реформування залізничного транспорту. *Ефективна економіка*. Електронне видання № 10, 2013. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2374>.
3. Кірдіна О. Г., Третяк З. І., Чечоткіна І. Ю. Управління витратами залізничного транспорту в умовах цифровізації економіки. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2022. № 78-79. С. 157-167.
4. Топоркова О. А., Шило Л. А., Ролік В. В. Управлінські аспекти аналізу витрат залізничного транспорту. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Проблеми економіки транспорту»*. 2016. Вип. 12. С. 42-48.
5. Сергієнко М. М. Системно-ситуаційне управління витратами локомотивного господарства залізничного транспорту: дис. ... канд. екон. наук: 08.07.04 / Київський університет економіки і технологій транспорту. Київ, 2006. 240 с.
6. Железняк О. О., Олещенко Л. М. Визначення собівартості пасажирсько-транспортного процесу. *Актуальні проблеми економіки*. 2012. № 11. С. 218-226.
7. Реформування бухгалтерського обліку на залізничному транспорті України / М. В. Макаренко, Ю. М. Цветов, Н. С. Соколовська та ін. Київ: КУЕТТ, 2002. 532 с.
8. Бухгалтерський облік основної діяльності залізниць України: підручник / Б. О. Шумляєв, Е. І. Рябий, В. І. Дзюба та ін.; за ред. Б. О. Шумляєва. Дніпропетровськ, 2004. 424 с.
9. Економічний енциклопедичний словник: у 2 т. / С. В. Мочерний, Я. С. Ларіна, О. А. Устенко, С. І. Юрій; за ред. С. В. Мочерного. Львів: Світ, 2005. Т. 1. 616 с.
10. Боїла Л. І. Сутність та склад витрат підсобно-допоміжної діяльності залізничного транспорту. *Вісник ЖДТУ. Науковий журнал: Економічні науки*. 2010. № 1(51). С. 153-156.
11. Номенклатура витрат з основних видів економічної діяльності залізничного транспорту України: затв. наказом ПАТ «Українська залізниця» від 01.11.2018 р. № 669-Ц. Київ: Укрзалізниця, 2018. 451 с.

Калабухін Юрій Євгенович, доктор технічних наук, професор кафедри маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>. Тел.: (057) 057-730-10-47. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Мартинів Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>.

Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Мартинів Станіслав Ігорович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>.

Тел.: +38 (050) 303-98-50. E-mail: st.mrtnv@gmail.com.

Kalabukhin Yuri, Sc. (Tech). Professor, Department of marketing, business activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>. Tel.: (057) 057-730-10-47. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, head department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Tel.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Trufanova Alena, PhD, associated professor department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Tel.: (057) 730-10-35.

E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com. Tel.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: trufanova@kart.edu.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>.

Martynov Stanislav. Postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. Tel.: +38 (050) 303-98-50.

E-mail: st.mrtvn@gmail.com.

Статтю прийнято 13.02.2024 р.

УДК 625...656

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Кандидати техн. наук Д. О. Потапов, В. Г. Вітольберг, асп. С. С. Чесак

ANALYTICAL REVIEW OF MODERN METHODS FOR ASSESSING THE CONDITION OF THE RAILWAY TRACK

PhD (Tech) D. O. Potapov, PhD (Tech) V. G. Vitolberg,
postgraduate student S. S. Chesak

Анотація. Підтримання залізничної колії в належному стані потребує постійного моніторингу її параметрів. Одним із головних показників є положення колії у просторі і часі. Це положення характеризується такими показниками, як повздовжній і поперечний профілі, положення колії в плані, перекося колії, ширина колії. Ці параметри безпосередньо впливають на динаміку взаємодії рухомого складу та залізничної колії. Різниця між фактичним і проєктним положеннями за кожним параметром може призводити до обмеження швидкості, а в деяких випадках і повного закриття руху по ділянці. Крім того, аналіз цих параметрів дає змогу на ранніх стадіях виявляти критичні стани та планувати профілактичне обслуговування. Але для комплексної оцінки стану залізничної колії доцільно розглядати не один окремий параметр, а їхню сукупність. За останні роки в різних країнах були проведенні численні дослідження, спрямовані на пошук найбільш об'єктивного індексу якості колії (Track Quality Index, TQI). Індекси якості колії – це абстрактні величини, що об'єднують і обчислюють за певним алгоритмом дані, отримані від колієвимірювальних засобів. Результатом виконаних обчислень є певна числова величина, яка характеризує стан окремої ділянки колії. Це дає змогу порівняти між собою різні ділянки, знайти найбільш пріоритетні для ремонту місця і спланувати роботи з поточного утримання колії. Аналіз бази даних із послідовних вимірювань однієї ділянки та експлуатаційних умов на ній дає змогу

розрахувати швидкість деградації геометричних параметрів колії, що у свою чергу створює передумови для прогнозування появи несправностей.

Ключові слова: *індекс якості колії, стандартне відхилення, геометрія колії, оцінка стану колії.*

Abstract. *Maintaining a railroad track in good condition requires constant monitoring of its parameters. One of the main indicators is the track position in space and time. This position is characterized by such indicators as longitudinal and transverse profile, track position in plan, track distortions, track width. These parameters directly affect the dynamics of interaction between rolling stock and railway track. The difference between the actual and design positions for each parameter can lead to speed restrictions and, in some cases, to the complete closure of traffic on the section. In addition, the analysis of these parameters makes it possible to identify critical conditions at an early stage and plan preventive maintenance. However, for a comprehensive assessment of the condition of a railroad track, it is advisable to consider not one single parameter, but their combination. In recent years, numerous studies have been conducted in different countries to find the most objective Track Quality Index (TQI). Track quality indices are abstract values that combine and calculate data obtained from track measuring instruments according to a certain algorithm. The result of the calculations is a certain numerical value that characterizes the condition of a particular section of track. This makes it possible to compare different sections with each other, find the highest priority areas for repair, and plan track maintenance work. The analysis of the database of consistent measurements of one section and the operating conditions on it makes it possible to calculate the rate of degradation of the geometric parameters of the track. This, in turn, creates prerequisites for predicting the occurrence of faults. This paper aims to consider different approaches to assessing the geometric parameters of a railway track using track quality indices.*

Keywords: *track quality index, standard deviation, track geometry, track condition assessment.*

Визначення мети та завдання дослідження. Узагальнення світового досвіду з оцінювання стану основних геометричних параметрів залізничної колії. Аналіз і порівняння сучасних методів оцінювання стану колії з чинною в Україні системою. Пошук потенційних інструментів для розроблення математичної моделі прогнозування накопичення залишкових деформацій залізничної колії, що дасть змогу попереджати появу несправностей колії.

Вступ. На сьогодні залізничний транспорт України працює в складних умовах. З одного боку, вітчизняна транспортна інфраструктура має задовольняти потреби країни в пасажирських і вантажних перевезеннях, а з іншого – у зв'язку з важкою економічною ситуацією необхідно раціонально використовувати обмежені матеріально-технічні ресурси. Для забезпечення

достатнього рівня безпеки перевезень в умовах воєнного стану необхідно більш гнучко планувати ремонтно-колійні роботи виходячи з фактичного стану колії, наявності необхідних матеріалів і техніки.

Залізнична колія – це інженерна споруда, на яку діє велика кількість статичних і динамічних навантажень. Під дією динамічного навантаження від рухомого складу та інших зовнішніх факторів у колії накопичуються дефекти і залишкові деформації.

Існує три аспекти зносу колії:

- субструктурний (тобто деградація підрейкової основи колії);
- надструктурний (тобто деградація верхньої будови колії);
- геометричний (тобто деградація геометрії колії) [4].

У перших двох аспектах модель деградації колії базується на зростанні

фізичних структурних умов. Досліджено параметри, що впливають на деградацію колії, включаючи пропускну спроможність, швидкість руху поїздів, характеристики баласту, типи рейок тощо, і проаналізовано кореляцію між ними для виведення загального рівняння, яке кількісно визначає швидкість деградації. І навпаки, моделі деградації колії у другому аспекті використовують геометричні параметри як основні критерії деградації. Для того щоб виміряти стан колії за допомогою цієї моделі, зазвичай колію розбивають на декілька коротших ділянок і для кожної з них виконують статистику геометричних параметрів. Потім статистичні дані про геометрію підсумовують, щоб отримати загальну оцінку якості ділянки, яку зазвичай називають індексом якості колії (Track Quality Index, TQI). Використання TQI дає можливість оцінити показники експлуатаційних характеристик залізничної колії, розробити заходи і порівняти характеристики колії до і після проведення заходів [5].

Тому регулярний моніторинг цих параметрів є важливим і невід'ємним етапом у плануванні робіт з поточного утримання та ремонту колії. Якісний аналіз стану колії дає змогу визначити найбільш критичні ділянки, які потребують ремонту, попередити розвиток дефектів до критичних значень, ефективно розподілити ресурси і спланувати об'єми та види робіт.

Основна частина. На сьогодні в Україні головним інструментом для вимірювання геометрії колії є комп'ютеризований вагон-лабораторія КВЛ-П. Вагон має можливість вимірювати такі параметри колії: взаємне положення рейок за висотою, місцеві осідання за кожною рейкою окремо, ширина колії, положення рейкових ниток за напрямком у плані. Також перевіряється непогашене прискорення та швидкість зміни непогашеного прискорення [16].

Для оцінювання отриманих значень встановлено п'ять ступенів відступів від норм утримання рейкової колії.

I ступінь – відступи в межах допусків, при яких забезпечено безпеку та плавність руху поїздів.

II ступінь – відступи, які не потребують зменшення встановленої швидкості, не загрожують безпеці руху поїздів, але впливають на плавність руху.

III ступінь – відступи, які не потребують зменшення встановленої швидкості, не загрожують безпеці руху поїздів, але впливають на плавність руху та інтенсивність накопичення залишкових деформацій.

IV ступінь – відступи, наявність яких за встановлених швидкостях погіршує плавність руху і призводить до інтенсивного накопичення залишкових деформацій колії.

V ступінь – відступи, які викликають зростання сил взаємодії колії та рухомого складу до таких критичних значень, що за наявності несприятливих поєднань із відступами в утриманні та завантаженні рухомого складу, порушеннями ведення поїзда, іншими умовами можуть призвести до швидкого зростання деформацій і виникнення загрози безпеці руху [15].

За кожний відступ III-V ступенів за кожний параметр нараховують штрафні бали. Сума балів вказує на загальний стан колії на кожному кілометрі (табл. 1).

Європейський стандарт EN 13848-5:2017 встановив три показники, які можуть бути використані для опису геометричної якості колії:

- екстремальні значення ізольованих дефектів. Частина сигналу, що вимірює певний параметр, яка перевищує встановлену межу принаймні в одній точці для кроку вимірювання 0.25 м;

- середньоквадратичне (стандартне) відхилення на визначеній довжині, зазвичай 200 м. Стандартне відхилення

використовують для подання варіації даних вимірювання геометрії колії. Низьке стандартне відхилення вказує на те, що вимірювання геометрії близькі до середнього значення, а високе стандартне відхилення вказує на те, що вимірювання

геометрії мають велику варіацію навколо середнього значення. Можна стверджувати,

що вище стандартне відхилення відображує більше нерівностей на колії [13];
- середнє значення.

Таблиця 1

Якісна оцінка колії за показаннями колієвимірального вагона

Оцінка	Сума балів за всі відступи на 1 км			
	Колії з непротер- мінованим капремонтом	Колії з протер- мінованим капремонтом	Колії з $V_{max} > 60$ км/год	Колії з $V_{max} \leq 40$ км/год
Відмінно	0-40	0-70	0-100	0-250
Добре	41-100	71-140	101-150	251-500
Задовільно	101-500	141-500	151-500	501-800
Незадовільно	≥ 501	≥ 501	≥ 501	≥ 801

Також на динаміку руху поїзда впливають як фактична величина відхилення, так і довжина цього відхилення. Встановлено три діапазони хвиль для вимірювання ізольованих дефектів, а також розрахунку стандартного відхилення ділянки колії:

- D1 – хвилі довжиною $3 \text{ м} < \lambda \leq 25 \text{ м}$;
- D2 – хвилі довжиною $25 \text{ м} < \lambda \leq 70 \text{ м}$;

D3 – хвилі довжиною $70 \text{ м} < \lambda \leq 150 \text{ м}$ для повздовжнього профілю, $70 \text{ м} < \lambda \leq 200 \text{ м}$ для положення в плані [14].

Геометричні параметри колії та спосіб вимірювання наведено в табл. 2.

Діапазоном довжин хвиль D3 нехтують, оскільки він не пов'язаний безпосередньо з безпекою руху, а більше комфортом руху транспортного засобу [14].

Таблиця 2

Параметр колії та спосіб вимірювання

Параметр	Спосіб вимірювання
Ширина колії	Екстремальні значення ізольованих дефектів. Відхилення ширини колії від середнього значення, виміряного на ділянці понад 100 м
Повздовжній рівень	Ізольовані дефекти – від нуля до пікового значення. Для $V_{max} \leq 160$ км/год – довжина хвиль у діапазоні D1. Для $160 < V_{max} \leq 360$ км/год – довжина хвиль у діапазонах D1 і D2
Рівень головок рейок	Абсолютне значення. Стандартом [14] не встановлені порогові значення для поперечного рівня головок рейок, оскільки цей параметр залежить від конструкції колії, будівельних правил, конструкції рухомого складу та типу експлуатації конкретної лінії
Положення в плані	Ізольовані дефекти – від нуля до пікового значення. Для $V_{max} \leq 160$ км/год – довжина хвиль у діапазоні D1. Для $160 < V_{max} \leq 360$ км/год – довжина хвиль у діапазонах D1 і D2
Перекуси колії	Екстремальні значення ізольованих дефектів. Пікові значення визначаються залежно від протяжності відхилення та конструкції колії

Стандартом EN 13848-5:2017 встановлено порогові значення ізольованих дефектів AL, ІЛ та ІАЛ для кожного параметра. Перевищення цих значень потребує певної реакції:

AL (Alert Limit) – ліміт тривоги. Потребує аналізу стану геометрії колії та врахування його при виконанні планових робіт із технічного обслуговування;

ІЛ (Intervention Limit) – ліміт втручання. Потребує проведення корегувальних робіт для того, щоб величина

відхилення не досягнула критичних значень;

ІАЛ (Immediate Action Limit) – ліміт негайної дії. Потребує вжиття заходів для зниження ризику сходу з рейок. Це може бути зроблено шляхом закриття лінії, зниження швидкості або невідкладної корекції геометрії колії.

Порогові значення ізольованих дефектів за кожним параметром для AL, ІЛ та ІАЛ наведено в табл. 3-5 [14].

Таблиця 3

Порогові значення ізольованих дефектів для AL

Швидкість	Ширина колії, мм	Ширина колії відносно середнього значення на ділянці більше 100 м, мм	Повздовжній рівень, мм		Положення в плані, мм		Перекося колії, виміряні на довжині 3 м, мм/м
			Довжина хвиль		Довжина хвиль		
			D1	D2	D1	D2	
$V \leq 80$	-7/+25	-6/+25	12-18	-	12-15	-	4
$80 < V \leq 120$	-7/+25	-5/+16	10-16	-	8-11	-	4
$120 < V \leq 160$	-6/+25	-3/+16	8-15	-	6-9	-	4
$160 < V \leq 230$	-4/+20	-3/+16	7-12	12-16	5-8	10-14	4
$230 < V \leq 300$	-3/+20	-1/+16	6-10	8-12	4-7	8-10	3
$300 < V \leq 360$	-3/+20	-/+16	6-8	8-10	3-6	6-8	3

Таблиця 4

Порогові значення ізольованих дефектів для ІЛ

Швидкість	Ширина колії, мм	Ширина колії відносно середнього значення на ділянці більше 100 м, мм	Повздовжній рівень, мм		Положення в плані, мм		Перекося колії, виміряні на довжині 3 м, мм/м
			Довжина хвиль		Довжина хвиль		
			D1	D2	D1	D2	
$V \leq 80$	-9/+30	-7/-	17-21	-	15-17	-	5
$80 < V \leq 120$	-9/+30	-6/+20	13-19	-	11-13	-	5
$120 < V \leq 160$	-8/+30	-4/+20	10-17	-	8-10	-	5
$160 < V \leq 230$	-5/+23	-4/+20	9-14	14-20	7-9	12-16	5
$230 < V \leq 300$	-4/+23	-2/+20	8-12	10-14	6-8	10-12	4
$300 < V \leq 360$	-4/+23	-1/+20	7-10	8-12	5-7	8-10	4

Таблиця 5

Порогові значення ізолюваних дефектів для IAL

Швидкість	Ширина колії, мм	Ширина колії відносно середнього значення на ділянці більше 100 м, мм	Повздовжній рівень, мм		Положення в плані, мм		Перекося колії, виміряні на довжині 3 м, мм/м
			Довжина хвиль		Довжина хвиль		
			D1	D2	D1	D2	
$V \leq 80$	-11/+35	-8/-	28	-	22	-	7
$80 < V \leq 120$	-11/35	-7/-	26	-	17	-	7
$120 < V \leq 160$	-10/+35	-5/-	23	-	14	-	7
$160 < V \leq 230$	-7/+28	-5/-	20	24	12	18	7
$230 < V \leq 300$	-5/+28	-3/-	16	18	10	14	5
$300 < V \leq 360$	-5/28	-2/-	14	16	8	12	5

Для загальної оцінки геометрії певної ділянки колії використовують різні методики. Багато країн Європи та Азії використовують стандартне відхилення в

основі розрахунку якості колії, але є країни, які використовують інші алгоритми. Нижче наведені країни та описані індекси якості колії, які в них використовуються (табл. 6).

Таблиця 6

Сучасні індекси оцінювання стану колії

Номер	Країна	Назва	Формула розрахунку
1	2	3	4
Індекси з використанням стандартного відхилення			
1	Великобританія	індекс SD	$\sum_{i=1}^7 \sigma_i$
2	Польща	Синтетичний коефіцієнт J	$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0.5 \cdot S_e}{3.5}$
3	Швеція	індекс Q індекс K	$\sigma_i = 150 - 100 \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} + 2 \cdot \frac{\sigma_S}{\sigma_{Slim}} \right) / 3$ $K = \frac{\sum l}{L} \cdot 100\%$
4	Канада	TQI	$TQI = \frac{\sum_{i=1}^6 TQI_i}{6}$
5	Нідерланди	Q _N	$Q_N = 10 \times 0.675 \sigma_i / \sigma_i^{80}$
6	Індія	TGI	$TGI = \frac{2UI + TI + GI + 6AI}{10}$
Індекси без використання стандартного відхилення			
7	Польща	П'ятипараметричний індекс	$W_5 = 1 - (1 - W_e) \cdot (1 - W_g) \cdot (1 - W_w) \cdot (1 - W_x) \cdot (1 - W_y)$

1	2	3	4
8	США	Індекс нерівностей колії	$R^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2$
9	США	FRA TQI	$TQI = \left(\frac{L_i}{L_0} - 1\right) \cdot 10^6$
10	Японія	P	–
11	Індонезія	TQI	–

Далі наведено більш розгорнутий опис підходів і методів, використовуваних для загальної оцінки геометрії залізничної колії на закордонних залізницях.

1. Великобританія. На залізницях Великобританії, а також Австралії та Китаю використовують **SD** (standard deviation) – індекс стандартного відхилення [12]. Його розраховують як суму стандартних відхилень σ_i за сімома параметрами колії: повздовжній рівень (ліва та права рейки окремо), положення колії в плані, ширина колії, положення однієї рейки за рівнем відносно іншої, поперечний рівень (ліва та права рейки окремо), за формулами

$$SD = \sum_{i=1}^7 \sigma_i, \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^2 - \bar{x}_i^2)}, \quad (2)$$

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^n \frac{x_{ij}}{n}, \quad (3)$$

де σ_i – стандартне відхилення за кожним параметром;

x_{ij} – вимірний параметр;

\bar{x}_i – середнє відхилення;

n – кількість виконаних вимірювань.

2. Польща. На залізницях Польщі використовують синтетичний коефіцієнт J [5] – середньоарифметичне від чотирьох розрахованих стандартних відхилень. Вплив

відхилень за шириною колії на коефіцієнт J зменшено у два рази відносно інших параметрів. Для розрахунку синтетичного коефіцієнта J використовують формулу

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0.5 \cdot S_e}{3.5}, \quad (4)$$

де S_z – вертикальні відхилення;

S_y – горизонтальні відхилення;

S_w – відхилення положення рейкової колії в плані;

S_e – стандартне відхилення за шириною колії.

Стандартне відхилення S за кожним вимірним параметром розраховують за формулою

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5)$$

де n – кількість вимірювань, виконаних на ділянці, стан якої аналізують;

x_i – значення геометричних параметрів у точці i ;

\bar{x} – середнє значення вимірних сигналів.

Для різних швидкостей руху встановлено відповідні максимально допустимі значення коефіцієнта J (табл. 7). У випадку перевищення цих значень необхідно виконати роботи з покращення стану колії.

Таблиця 7

Допустимі значення синтетичного коефіцієнта J залежно від встановленої швидкості

Встановлена швидкість, км/год	Допустимий коефіцієнт J, мм	Встановлена швидкість, км/год	Допустимий коефіцієнт J, мм
80	7.0	150	2.3
90	6.2	160	2.0
100	5.5	170	1.7
110	4.9	180	1.6
120	4.0	190	1.5
130	3.5	200	1.4
140	2.8	220 ¹	1.1

3. Швеція. Індексом Q та K користуються не тільки у Швеції, але і Норвегії та Данії. Як і інші показники, в основі яких закладено розрахунок стандартного відхилення, Q та K дають загальну оцінку стану колії на певних ділянках. Але їх не можна використовувати для ідентифікації точкових дефектів. Відповідно до робіт [7, 8] розрахунок базується на визначенні чотирьох геометричних стандартних відхилень:

- повздовжній рівень σ_H ;
- положення в плані σ_V ;
- рівень головок рейок σ_R ;
- комбінований параметр σ_S (ширина колії, положення колії в плані, рівень головок рейок).

Як правило, індекс Q розраховують для ділянок довжиною 200 м. Формула для розрахунку має загальний вигляд:

$$\sigma_i = 150 - 100 \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} + 2 \cdot \frac{\sigma_S}{\sigma_{Slim}} \right) / 3, \tag{6}$$

де σ_H – середнє стандартне відхилення повздовжнього рівня для лівої та правої рейок, мм;

σ_S – комбінований параметр, мм;

σ_{Hlim} – допустиме середнє стандартне відхилення повздовжнього рівня для лівої та правої рейок, мм;

σ_{Slim} – допустиме відхилення комбінованого параметра.

σ_{Hlim} і σ_{Slim} залежать від класу колії або допустимої швидкості руху (табл. 8). Порогові значення для Q становлять від 50 до 100, допустимі – 70-90 [2].

Таблиця 8

Порогові значення стандартних відхилень для розрахунку індексів Q та K

Клас колії	Допустима швидкість	Повздовжній рівень σ_H	Рівень головок рейок σ_R	Положення в плані σ_V	Комбінований параметр σ_S
K0	145-	1,1	0,9	1,1	1,6
K1	125-140	1,3	1,0	1,2	1,7
K2	105-120	1,5	1,2	1,3	1,9
K3	75-100	1,9	1,4	1,7	2,4
K4	40-70	2,4	1,8	2,0	3,1
K5	-35	2,9	2,2	2,4	3,6

Індекс K розраховують для ділянок колії довжиною 1000 м як [7, 8]

$$K = \frac{\sum l}{L} \cdot 100\% , \quad (7)$$

де $\sum l$ – сума довжин колії, де значення σ_i виходить за межі порогових значень і відповідності класу колії;

L – загальна довжина ділянки обстеження.

Індекс K недоцільно використовувати для коротких ділянок колії.

4. Канада. Для визначення індексу якості колії на Канадській національній залізниці використовують шість головних геометричних параметрів колії: повздовжній профіль і положення в плані (для обох рейкових ниток окремо), рівень головок рейок і ширину колії [11]. Для розрахунку використовують поліном другого порядку для стандартного відхилення:

$$TQI_i = 1000 - C + \sigma_i^2. \quad (8)$$

де C – константа, яка залежить від категорії колії (700 – для головних колій);

σ_i^2 – квадрат стандартного відхилення для кожного параметра.

Загальний показник якості колії обчислюють як середньоарифметичне від отриманих результатів. Чим більший показник TQI , тим кращий стан колії [2].

$$TQI = \frac{\sum_{i=1}^6 TQI_i}{6}. \quad (9)$$

5. Нідерланди. Нідерландський індекс якості колії Q_N розроблений з урахуванням

того, що 20 % залізничних ліній країни рекомендовані до виконання виправно-підбивальних робіт колійними машинами. Він є більш гнучким до різних категорій колій.

Для визначення 20 % ділянок, які мають найгірші показники, ділянку колії довжиною 5-10 км поділяють на секції 200 м. Визначають Q_N для кожної секції та Q_N для всієї ділянки (з урахуванням 80 % стандартного відхилення для всієї ділянки). Порівнюють визначені показники Q_N між собою. Чим більше показник Q_N , тим кращий стан колії [9].

$$Q_N = 10 \times 0.675 \sigma_i / \sigma_i^{80}, \quad (10)$$

де σ_i – стандартне відхилення для кожного геометричного параметра. Визначають для ділянок довжиною 200 м;

σ_i^{80} – 80-відсотковий квантиль, взятий від σ_i , визначеного на ділянці довжиною 5-10 км.

6. Індія. Індійський індекс TGI (Track Geometry Index), як і більшість інших попередніх індексів, розраховують для ділянок колії довжиною 200 м і в його основі лежить стандартне відхилення. Але вплив кожного параметра на значення TGI нерівномірний [1, 2]:

$$TGI = \frac{2UI+TI+GI+6AI}{10}, \quad (11)$$

де UI – повздовжній рівень;

TI – положення колії в плані;

GI – ширина колії;

AI – рівень головок рейок.

Кожну складову цього індексу розраховують за такою формулою:

$$UI, TI, GI, AI = 100 \cdot e^{-\left(\frac{SD_{mes}-SD_n}{SD_{maint}-SD_n}\right)}, \quad (12)$$

де SD_{mes} – стандартне відхилення вимірюваного параметра;

SD_{maint} – допустиме стандартне відхилення при поточному утриманні колії;

SD_n – допустиме стандартне відхилення для нової колії.

Порогові значення для SD_{maint} і SD_n наведено в табл. 9. Чим більше розрахований показник TGI, тим кращий стан колії (табл. 10) [5].

Таблиця 9

Порогові значення стандартного відхилення для SD_{maint} і SD_n , мм

Параметр	Довжина хорди	SD_n	SD_{maint} для швидкості ≥ 105 км/год	SD_{maint} для швидкості < 105 км/год
UI	9.6	2.50	6.2	7.2
TI	3.6	1.75	3.8	4.2
GI	1.0	1.00	3.6	3.6
AI	7.2	1.5	3.0	3.0

Таблиця 10

Класифікація робіт із поточного утримання колії залежно від отриманого TGI

Номер	Показник TGI	Тип поточного обслуговування
1	$TGI > 80$	Не потребує виконання робіт
2	$50 < TGI < 80$	Потребує виконання базових робіт
3	$36 < TGI < 50$	Потребує виконання планових робіт
4	$TGI < 36$	Потребує виконання невідкладних робіт

7. Польща. П'ятипараметричний індекс якості колій позначають як W_5 . Цей підхід розглядає дефектність кожного

геометричного параметра як незалежну подію на практиці [3, 10]:

$$W_5 = 1 - (1 - W_e) \cdot (1 - W_g) \cdot (1 - W_w) \cdot (1 - W_x) \cdot (1 - W_y), \quad (13)$$

де W_e – дефектність за шириною колії;

W_g – рівень головок рейок по відношенню одна до одної;

W_w – відхилення положення рейкової колії в плані;

W_x і W_y – середньоарифметичні значення вертикальних і горизонтальних нерівностей, визначені на основі положення лівої та правої рейкових ниток.

Коефіцієнт дефектності кожного параметра W у цьому підході розраховують за формулою

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l}, \quad (14)$$

де l_i – довжина ділянки i , на якій перевищено допустиме значення W_e, W_g, W_w, W_x, W_y відповідно;

l – загальна довжина ділянки дослідження;

l – кількість перевищень допустимого порогу для вимірної ділянки.

Стан колії оцінюють на основі перевищення максимально допустимих

значень. Якісну оцінку стану колії залежно від величини W_5 наведено в табл. 11 [1].

Таблиця 11

Стан колії залежно від отриманого W_5

Оцінка колії	Нова колія	Добрий стан	Задовільний стан	Незадовільний стан
Показник W_5	$W_5 < 0.1$	$W_5 < 0.2$	$W_5 < 0.6$	$W_5 > 0.6$

8. США. Індекс нерівностей колії було розроблено в США національною залізничною компанією Amtrak. Оцінюють стан колії за чотирма параметрами: повздовжній рівень, положення колії в плані, рівень головок рейок і ширина колії. Розраховують як відношення суми квадратів вимірних відхилень до кількості вимірювань [2, 12]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}, \quad (15)$$

де d_i^2 – квадрат відхилення за кожним параметром у точці i ;

n – кількість вимірних точок.

9. США. У 2000 році Управління досліджень і розробок Федеральної

залізничної адміністрації США ініціювало дослідження з розроблення нових індексів якості колії на основі фактичних даних про геометрію колії. У період із 2000 по 2002 рік було проведено широкомасштабне дослідження стану колії – більше третини залізниці країни.

В основі концепції лежить порівняння довжини просторової кривої з прямим відрізком, який об'єднує кінцеві точки цієї кривої. Чим більша нерівномірність ділянки колії, тим більша довжина просторової кривої, якщо розтягнути її у пряму лінію [6].

Розроблений індекс якості колії (FRA TQI) розраховують для ділянок колії довжиною 528 футів (160.93 м), крок вимірювань 1 фут (0,3048 м). Довжину просторової кривої між двома послідовними точками визначають за формулою [11]

$$L_i = \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{(y_{i(j+1)} - y_{ij})^2 + (x_{j+1} - x_j)^2}, \quad (16)$$

де L_i – довжина просторової кривої;

n – кількість вимірювань;

y_{ij} – значення виміряного параметра в точці j ;

$y_{i(j+1)}$ – значення виміряного параметра в точці $j+1$;

x_j – координата точки початку вимірювань;

x_{j+1} – координата точки закінчення вимірювань.

Індекс якості розраховують для повздовжнього профілю, положення в плані, рівня головок рейок і ширини колії.

$$TQI_i = \left(\frac{L_i}{L_0} - 1\right) \cdot 10^6, \quad (17)$$

де L_0 – теоретична довжина ділянки колії.

10. Японія. Індекс Р, прийнятий на японських залізницях, є відношенням кількості точок відбору проб, вимірювання

параметрів якості яких виходять за межі ± 3 мм, до кількості всіх точок відбору проб на ділянці колії. Існує дві довжини відрізків колії, до яких застосовують індекс Р: 100 м і 500 м. Чим більший індекс Р, тим гірший відрізок колії в певному аспекті якості [12].

11. Індонезія. Стан колії оцінюють за чотирма параметрами: ширина колії, повздовжній профіль, положення колії в плані та рівня головок рейок. Відхилення за

кожним параметром потім підсумовують для отримання значення TQI. TQI не має одиниці вимірювання, тому що одиниця суми, мм, однакова, але відрізняється за вектором. Індонезійський TQI класифікують як чотири секції та перетворюють на категорію стану колії від I до IV. Класифікація категорії стану колій наведена в табл. 12 [9].

Таблиця 12

Класифікація стану залізничної колії в Індонезії

Параметр	Категорія 1	Категорія 2	Категорія 3	Категорія 4
Ширина колії	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
Повздовжній профіль	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
Положення в плані	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
Рівень головок рейок	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
TQI	0-20	21-40	41-60	> 60
Швидкість, км/год	$100 \leq V_{\max} \leq 120$	$80 \leq V_{\max} \leq 100$	$60 \leq V_{\max} \leq 80$	$V_{\max} < 60$
Стан колії	Комфорт	Безпечно	Умовно безпечно	Небезпечно
Тип обслуговування	Поточний ремонт	Плановий ремонт	Першочерговий ремонт	Невідкладний ремонт

Висновки. На сьогодні в переважній більшості систем оцінювання стану залізничної колії використовують комплексний підхід: з одного боку, виявлення ізольованих дефектів і встановлення для них граничних порогових значень, а з іншого – загальна оцінка ділянки колії з використанням єдиного показника на основі стандартних відхилень від норм утримання відповідних характеристик.

Об'єднання стандартного відхилення основних геометричних параметрів колії в один показник дає змогу певною мірою більш гнучко враховувати вплив основних видів несправностей і відхилень на загальний стан колії. Виходячи з того, що відповідні параметри мають різні амплітуди розподілу значень, (наприклад ширина колії

та повздовжній рівень), деякі методики намагаються нівелювати цей фактор, зменшуючи (коефіцієнт J, Польща) або збільшуючи (TGI, Індія) вплив певних параметрів на загальну оцінку колії. В окремих випадках використовують відношення розрахованого стандартного відхилення до емпірично визначеного стандартного відхилення для нової колії (індекс Q, Швеція). Також можна відзначити системи оцінювання, у яких при визначенні індексу якості колії не використовують стандартне відхилення, наприклад індекс нерівностей колії, запропонований американською компанією Amtrak.

Результати проведеного огляду наявних методів оцінювання можуть бути використані при розробленні пропозицій

щодо внесення змін і доповнень до чинної системи оцінювання стану колії на залізницях України, а також при проведенні досліджень з прогнозування зміни окремих

геометричних характеристик залізничної колії в процесі експлуатації для попередження появи несправностей і відхилень від норм утримання.

Список використаних джерел

1. Daniel H/Michael, Elias Kassa, Getu Segni School of Civil and Environmental Engineering, African Railway Center of Excellence. *Journal of EEA*. Vol. 40, July 2022.
2. Stefan Offenbacher, Johannes Neuhold, Peter Veit and Matthias Landgraf Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI. *Appl. Sci.* 2020. 10(23). 8490. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238490>.
3. Andrzej Chudzikiewicz, Roman Bogacz, Mariusz Kostrzewski, Robert Konowrocki Condition monitoring of railway track systems by using acceleration signals on wheelset axle-boxes. *TRANSPORT*. ISSN 1648-4142, 2018. Vol. 33(2). 555–566.
4. Sadeghi J., Askarinejad H. Influences of track structure, geometry and traffic parameters on railway deterioration, *IJE Transactions B: Applications*. December 2007. Vol. 20. No. 3. 291.
5. Abdur Rohim Boy Berawi, Raimundo Delgado, Rui Calçada, Cecilia Vale Evaluating track geometrical quality through different methodologies. *International Journal of Technology*. (2010). 1: 38 - 47.
6. Dr. Magdy El-Sibaie, Ms. Sun Lee, Mr. Mo Fateh Development of Objective Track Quality Indices. *Research Results*. RR05-01. March 2005.
7. Christer Stenström Maintenance Performance Measurement of Railway Infrastructure with Focus on the Swedish Network, Division of Operation, Maintenance and Acoustics Engineering, Luleå University of Technology, Sweden May 2012. ISSN: 1402-1536.
8. Ambika Prasad Patra. Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses, Luleå University of Technology. *Printed by Universitetstryckeriet*. Luleå 2009. ISSN: 1402-1544.
9. Dian Setiawan M., Sri Atmaja P. Rosyidi Track quality index as track quality assessment indicator. *Simposium XIX FSTPT, Universitas Islam Indonesia*. 11-13 Oktober 2016.
10. Tzu-Hao Yan, Francesco Cormann Assessing and Extending Track Quality Index for Novel Measurement Techniques in Railway Systems. *Transportation Research Record*. 2020. Vol. 2674(8). 24–36. URL: <https://doi.org/10.1177/0361198120923661>.
11. Nur Intan Amira Mat Zahari, Joewono Prasetijo, Yusoff Mamat Maintenance Study of Rail Track Structure for Temporary Track at Electrified Double Track Project (EDTP) Gemas-JB. *Progress in Engineering Application and Technology*. (2022). Vol. 3, No. 2. 774–782. URL: <https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/7929>.
12. Reng-Kui Liu, Peng Xu, Zhuang-Zhi Sun, Ce Zou, and Quan-Xin Sun Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro, Hindawi Publishing Corporation *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015, Article ID 473830. 9 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/473830>.
13. Iman Soleimanmeigouni Predictive Models for Railway Track Geometry Degradation, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, SE- 97187 Luleå, Sweden, 2019.
14. EUROPEAN STANDARD EN 13848-5:2017 E, Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels – Plain line, switches and crossings, August 2017.

15. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. Київ : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. 456 с.

16. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірjувальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання колії. Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. 46 с.

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (067) 678 80 81.

E-mail: potapov_xiit@ukr.net.

Вітольберг Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730 10 60.

E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Чесак Сергій Сергійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 910 38 67. E-mail: serheychesak@gmail.com.

D. O. Potapov, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Railway Track and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (067) 678 80 81, E-mail: potapov_xiit@ukr.net.

V.G. Vitolberg, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Railway Track and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730 10 60, E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

S. S. Chesak, postgraduate student of the Department of Railway Track and Transport Facilities of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: +38 (098) 910 38 67, E-mail: serheychesak@gmail.com.

Статтю прийнято 21.03.2024 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 37.014.1:629.331:656

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ ЕЛЕКТРОННОГО НАВЧАННЯ MOODLE ДЛЯ ОСВІТНЬОЇ КОМПОНЕНТИ «ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ»

Канд. техн. наук І. О. Хітров

THE USE OF MOODLE E-LEARNING PLATFORM FOR THE EDUCATIONAL COMPONENT «VEHICLES»

PhD (Tech.) I. Khitrov

***Анотація.** У статті наведено дослідження щодо ефективного використання платформи електронного навчання Moodle у навчальному процесі під час вивчення освітньої компоненти «Транспортні засоби» спеціальності 275 «Транспортні технології». Робота охоплює аналіз можливостей Moodle для оптимізації процесу навчання з тематики транспортних засобів, урахувуючи різноманітність матеріалів, інтерактивність і доступність для здобувачів вищої освіти. Дослідження включає аналіз функціонала Moodle для наповнення курсу, використання різних типів оцінювання, а також моніторингу успішності здобувачів з вивчення матеріалу, проведення опитування. Основна мета полягає в підвищенні ефективності навчального процесу за допомогою інноваційних методів та інструментів, доступних у Moodle.*

***Ключові слова:** транспортні технології, транспортні засоби, освітня компонента, освітня платформа, дистанційний освітній курс.*

***Abstract.** Given the increasing use of course management systems as a teaching tool, it is important to pay attention to the potential of using educational technologies in higher education institutions. Whatever the reasons, most learning tools are currently underutilized in teaching and need to be studied and popularized more deeply among both teachers and students. It is thanks to its simple interface, responsive design, and ease of use that Moodle has been adopted by many universities and organizations around the world. The National University of Water and Environmental Engineering did not stand aside. Moodle is a universal educational platform for conducting face-to-face, practical and online classes that allows you to centrally manage the entire learning environment, which will increase the efficiency of work within the institution. For students, Moodle is a centralized platform for educational information that facilitates access to the necessary information and creates a better learning environment, ensuring close interaction between the teacher and the student. The study reveals the possibilities of using Moodle for the educational component «Vehicles» based on the results obtained and feedback from participants in the educational process in the context of the specialty «Transport Technologies». The content of the educational component «Vehicles» is carried out thematically in the relevant sections: educational program, syllabus, grading scale, lecture support, methodological support for laboratory work, laboratory work, recommendations for self-study, current module and final control, teaching materials, non-formal and informal education, etc. The study reflects the capabilities of Moodle's functionality for course content, the use of various types of assessment, as well as monitoring students'*

progress in learning the material, and conducting surveys. The main goal is to improve the quality of learning through digital tools and methods, providing students with constant access to a variety of resources combined in one environment, promoting more effective learning and increasing interest in the course.

Keywords: *transportation technologies, vehicles, educational component, educational platform, distance educational course.*

Вступ. Серед розмаїття платформ електронного навчання особливе місце займає стандартна світова система управління навчанням Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment), яка у 2023 році налічувала більше 17 мільйонів сайтів і 300 мільйонів користувачів у понад 241 країні [1]. Більше 20 років користувачі довіряють Moodle як постачальнику інноваційних продуктів, орієнтованих на результативне навчання, надання можливостей користувачу розкрити свій творчий потенціал, сприяння співпраці та оптимізацію результатів навчання [2]. Вона має найбільшу частку ринку серед університетів Європи та Японії і широко використовується не лише у сфері освіти, а і глобальних компаніях, державних установах та інших організаціях.

Навчальна платформа Moodle відповідає різним міжнародним стандартам, таким як Open Source Initiative, IMS LTI™, SCORM-ADL, Open Badges тощо [1]. Це досить гнучка та масштабована система, яку легко адаптувати до індивідуальних потреб, адже вона розроблена за принципом модульності та інтероперабельності (здатності до взаємодії) і забезпечує безперешкодну інтеграцію з зовнішніми додатками, платформами та іншими системами з безмежними можливостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З огляду на дедалі ширше впровадження систем управління навчальними курсами, як навчального інструменту, важливо звернути увагу на потенціал використання освітніх технологій у закладах вищої освіти.

Зокрема, використання таких інструментів у навчанні в освітніх закладах Йорданії проаналізував Muhannad Al-Shboul

[3], зазначивши, що підготовка викладачів є важливим фактором для успішного впровадження нових технологій у середовище викладання та навчання.

Дослідження, проведені Jamie T. Nelson, показують, що багато викладачів вирішують інтегрувати освітні інструменти з різних причин. Деяких із них цікавить фактор зручності спілкування зі здобувачами за допомогою цих інструментів, тоді як інші мотивовані адміністративним тиском [4].

Дослідники О. С. Рижков і Р. С. Рижков пропонують для українського ринку надання освітніх послуг за допомогою онлайн платформи «WeStudy» [5].

Якими б не були причини, більшість інструментів навчання наразі недостатньо використовуються у викладанні і потребують глибшого вивчення та популяризації як серед колег-викладачів, так і здобувачів вищої освіти.

Визначення мети та завдання дослідження. Основна мета – покращити якість навчання за допомогою цифрових інструментів і методів, забезпечивши здобувачам освіти доступ до різних ресурсів і сприяючи їхньому більш активному навчанню та підвищенню інтересу до опанування освітньої компоненти, зокрема використанням платформи Moodle.

Для досягнення сформульованої мети потрібно систематизувати і проаналізувати можливості платформи електронного навчання Moodle для оптимізації навчального процесу.

Основна частина дослідження. Саме завдяки простому інтерфейсу, адаптивному дизайну, простоті використання Moodle був прийнятий багатьма університетами та організаціями у всьому світі. Не залишився

осторонь і Національний університет водного господарства та

природокористування (НУВГП), м. Рівне (рис. 1).



Рис. 1. Головна сторінка навчальної платформи Moodle в НУВГП [6]

Головна мета навчальної платформи Moodle НУВГП полягає у створенні умов для реалізації вимог освітніх стандартів, наданні здобувачам вищої освіти комплекту навчально-методичних матеріалів для аудиторного та самостійного засвоєння освітньої компоненти обов'язкової та вибіркової частин освітньої програми, за якими проводиться підготовка фахівців в університеті у вигляді цифрових технологій навчання за будь-якою формою навчання [7].

Moodle – це універсальна освітня платформа для проведення очних,

практичних та онлайн занять, що дає змогу централізовано управляти всім навчальними середовищем, що підвищить ефективність роботи всередині закладу. Використовуючи Moodle, який також інтегрується з внутрішніми системами, можна перейти від складного до простого централізованого управління, що підвищить ефективність роботи всередині університету, скоротить час і витрати викладачів, а також допоможе створити середовище, у якому викладачі зможуть зосередитися тільки на навчанні (рис. 2).

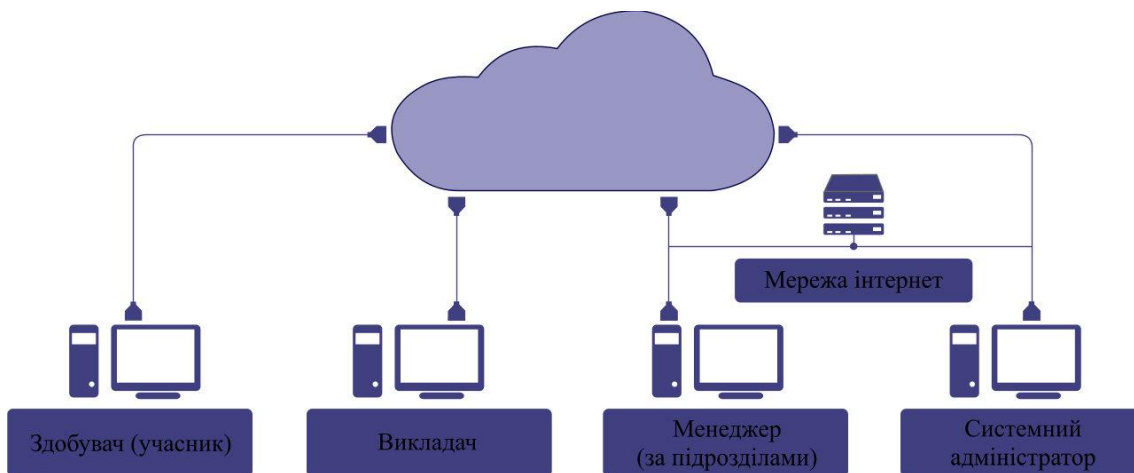


Рис. 2. Структура централізованого управління Moodle [1]

Упровадження програмного забезпечення для створення електронних навчальних курсів та управління навчанням Moodle має переваги і недоліки.

До переваг Moodle можна віднести безкоштовність і відкритість (безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, що дає змогу користувачам вільно використовувати, змінювати і розповсюджувати його); гнучкість і налаштування (адміністратори та викладачі можуть власноруч налаштовувати навчальні курси, створювати завдання та використовувати різні методи оцінювання); активна спільнота користувачів (існує велика спільнота користувачів, за допомогою якої можна обмінюватися досвідом, отримувати підтримку і робити свій внесок до розвитку системи); масштабованість (підтримка великої кількості користувачів, успішне використання як для невеликих навчальних груп, так і великих закладів освіти); багатофункціональність (має величезний функціонал, включаючи можливість створення форумів, завдань, тестів та інших навчальних інструментів).

Недоліки використання Moodle, над усуненням яких необхідний певний час, – труднощі для новачків в оволодінні всіма можливостями та налаштуваннями; дизайн інтерфейсу (може здаватися деяким

користувачам застарілим або менш інтуїтивно зрозумілим порівняно з іншими сучасними системами управління навчанням); потреба в технічній підтримці (для ефективного використання необхідно мати певні технічні знання або отримувати підтримку від кваліфікованих фахівців); обмежена інтеграція з іншими системами (у деяких випадках можуть виникати труднощі з інтеграцією Moodle з іншими системами, особливо якщо вони використовують власні стандарти); безпека (важливо підтримувати систему оновленою для усунення можливих проблем з безпекою).

Розглянемо наповнення освітньої компоненти «Транспортні засоби» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)» галузі знань 27 «Транспорт» на навчальній платформі [8]. Доступ до електронного забезпечення кожної освітньої компоненти, передбаченої навчальними планами освітньої програми, для викладача і здобувача персоніфікований через корпоративну пошту (рис. 3). Для здобувачів усі освітні компоненти активні в період використання їх у навчальному процесі згідно з графіком освітнього процесу.

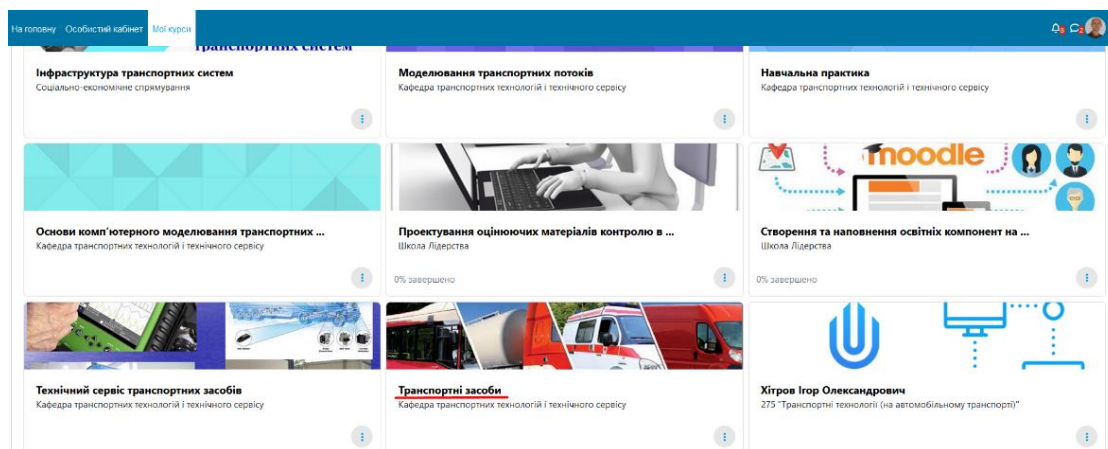


Рис. 3. Фрагмент головної сторінки «Мої курси» викладача І. О. Хітрова

Освітня компонента «Транспортні засоби» формує професійні якості майбутніх фахівців із транспортних технологій щодо вибору типу, моделей і модифікацій транспортних засобів для здійснення перевезень, функціонального складу, конструкції сучасних вітчизняних і закордонних автомобілів і причіпного складу, специфіки умов їхньої експлуатації з забезпеченням безпеки [9].

Наповнення освітньої компоненти «Транспортні засоби» здійснюється тематично за відповідними секціями: освітня програма, силабус, шкала оцінювання, лекційне забезпечення,

методичне забезпечення для лабораторних робіт, лабораторні роботи, рекомендації для самостійного вивчення, поточний модульний і підсумковий контроль, навчальні матеріали, неформальна та інформальна освіта тощо (рис. 4).

Назви секцій містять гіперпосилання на вкладений ресурс (наприклад освітню програму, силабус, лекційне і методичне забезпечення, посилання на освітні платформи, відеопрезентації). Шкала оцінювання містить інформацію про розподіл балів за видами робіт поточної і модульної складових оцінювання (рис. 5).

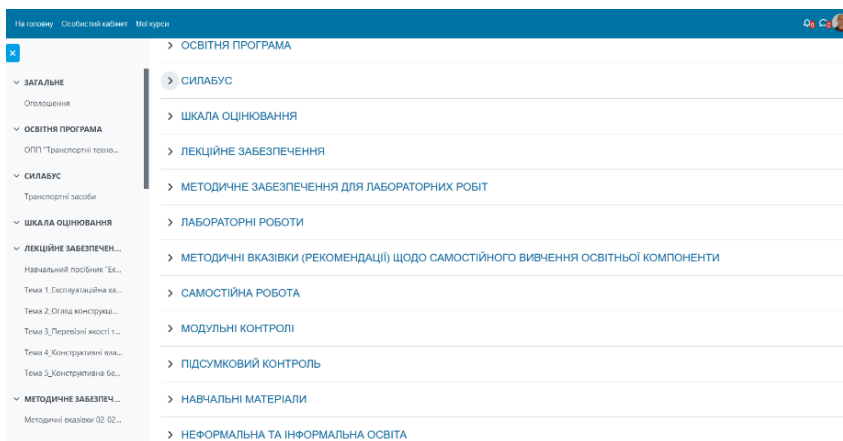


Рис. 4. Структура наповнення освітньої компоненти «Транспортні засоби»

The screenshot shows a table titled 'ШКАЛА ОЦІНЮВАННЯ' (Grading Scale). It lists various tasks and their scores. The tasks are grouped into 'Поточна складова оцінювання' (Current assessment component) and 'Модульна складова оцінювання' (Module assessment component). The total score for the current component is 60, and for the module component, it is 40. The overall total score is 100.

Вид заняття	Бали
1. Поточна складова оцінювання	
1.1.1. Лабораторна робота №1. Види транспортних засобів та їх класифікаційні ознаки	3
1.1.2. Лабораторна робота №2. Загальна будова транспортних засобів	5
1.1.3. Лабораторна робота №3. Дослідження конструктивних особливостей силової установки транспортних засобів	10
1.1.4. Лабораторна робота №4. Дослідження конструктивних особливостей агрегатів трансмісії транспортних засобів	5
1.1.5. Лабораторна робота №5. Дослідження конструктивних особливостей підвіски і коліс транспортних засобів	3
1.1.6. Лабораторна робота №6. Дослідження конструктивних особливостей рульового керування транспортних засобів	3
1.1.7. Лабораторна робота №7. Дослідження конструктивних особливостей гальмівної системи транспортних засобів	5
1.1.8. Лабораторна робота №8. Дослідження конструктивних особливостей несучої системи транспортних засобів	3
1.1.9. Лабораторна робота №9. Визначення основних параметрів прохідності автомобільного транспортного засобу	3
1.1.10. Лабораторна робота №10. Визначення координат центра ваги автомобільного транспортного засобу	5
1.1.11. Лабораторна робота №11. Дослідження рівня шуму при роботі транспортних засобів	5
1.3. Самостійна робота	10
Всього поточна складова оцінювання:	60
2. Модульна складова оцінювання:	
2.1. Модульний контроль №1	20
2.2. Модульний контроль №2	20
Всього модульна складова оцінювання:	40
Разом:	100

Рис. 5. Шкала оцінювання видів робіт

Лекційне забезпечення освітньої компоненти «Транспортні засоби» містить посилання на навчальний посібник, конспект лекцій за всіма темами згідно з силабусом [6], ілюстративні, відеоматеріали тощо (рис. 6).

Тема «Лабораторні роботи» містить тестовий модуль діяльності і призначений для оцінювання рівня знань здобувачем за

кожною лабораторною роботою (рис. 7). Цей модуль налаштовує викладач (дату проведення, кількість спроб, розподіл балів тощо). Зручність цього модуля полягає в тому, що система автоматично виставляє кількість балів, які викладач вносить до електронного журналу, а здобувач може ознайомитися з наданими відповідями.

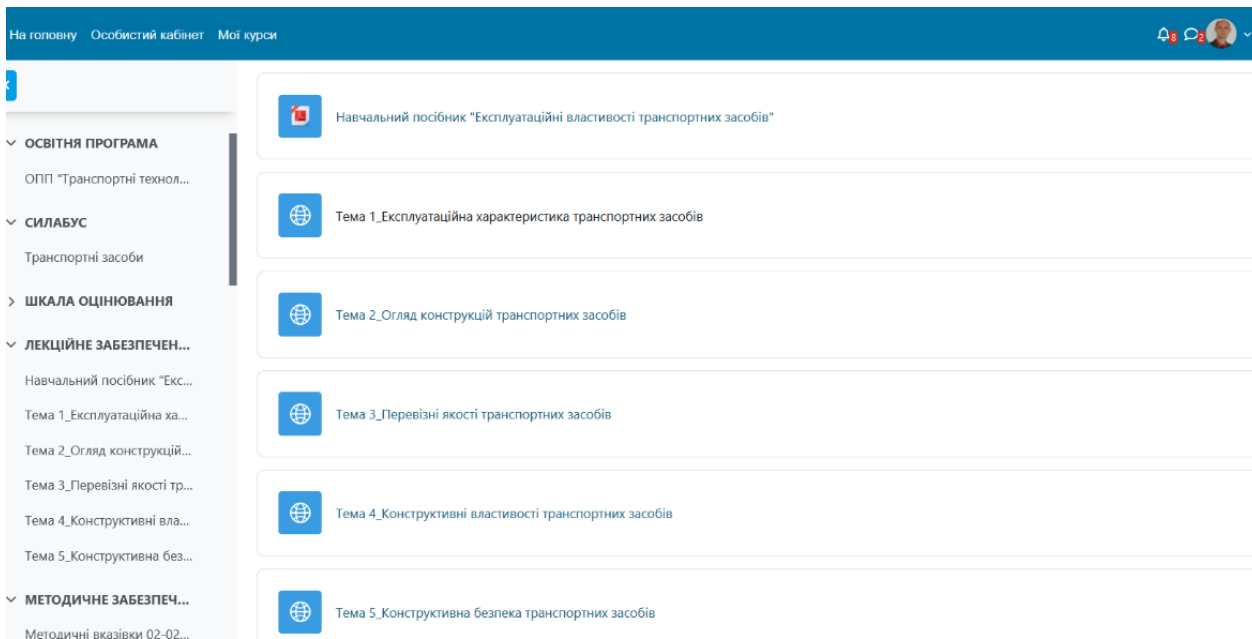


Рис. 6. Лекційне забезпечення освітньої компоненти «Транспортні засоби»

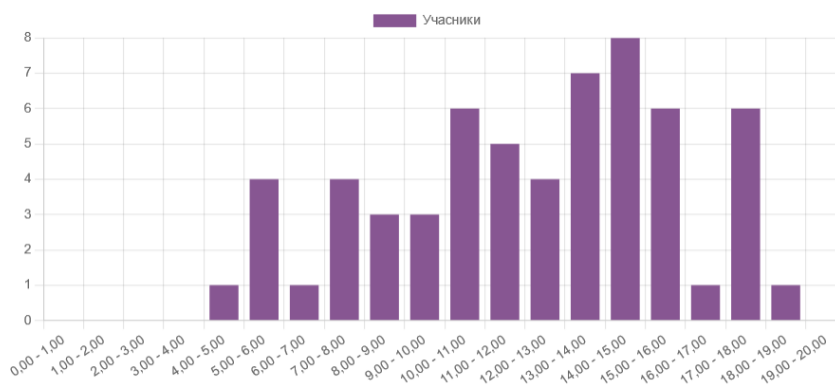
Прізвище / Ім'я	Електронна пошта	Стан	Розпочато	Завершено	Затрачений час	Оцінка/3,00	Пит.1	Пит.2	Пит.3	Пит.4	Пит.5	Пит.6	Пит.7	Пит.8	Пит.9	Пит.10	Пит.11	
							/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	/0,25	
Маліновський Іван Ігорович	mailnovskyi_m23@nuwm.edu.ua	Завершено	4 жовтня 2023 13:46 PM	4 жовтня 2023 14:00 PM	14 хв 4 сек	2,50	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✗ -0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25
Гогусь Юлія Вікторівна	hohus_m23@nuwm.edu.ua	Завершено	4 жовтня 2023 13:46 PM	4 жовтня 2023 14:00 PM	13 хв 58 сек	3,00	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25	✓ 0,25
Демченко Сергій Сергійович	demchenko_m23@nuwm.edu.ua	Завершено	Питання 7 Відповіді ще не було Макс. оцінка до 0,25		До якої групи класифікаційних ознак відноситься рульове керування автомобілем шляхом складання елементів рами? Виберіть одну відповідь: <input type="radio"/> а. за способом маневрування автомобілем <input type="radio"/> б. за способом повороту автомобіля <input type="radio"/> в. за принципом дії <input type="radio"/> г. за принципом повороту													
Кузьміч Аїда Миколаївна	kuzmich_m23@nuwm.edu.ua	Завершено	ПОПЕРЕДНЯ СТОРІНКА															
Кадун Сергій	kadun_m23@nuwm.edu.ua	Завершено																
Зінчук Олександр Андрійович	zinchuk_m23@nuwm.edu.ua	Завершено																

Рис. 7. Результати захисту лабораторних робіт

Оцінювання теоретичного матеріалу за змістовими модулями (темами лекцій) здійснюється шляхом поточного і підсумкового контролю (іспит), містить модуль «тест» і включає завдання трьох рівнів складності: достатній (знання і розуміння основних положень навчального матеріалу) – запитання з однією правильною відповіддю з п'яти запропонованих; вище достатнього рівня складності (передбачає повне засвоєння навчального матеріалу, володіння понятійним апаратом, орієнтування у вивченому матеріалі, свідоме використання знань для вирішення

завдань) – запитання з двома правильними відповідями з п'яти запропонованих; високий рівень складності (передбачає глибоке і повне опанування змісту навчального матеріалу, у якому здобувач вільно орієнтується, володіє понятійним апаратом, уміє пов'язувати теорію з практикою, вирішувати практичні завдання, висловлювати і обґрунтовувати свої судження) – практична задача (рис. 8). Цей модуль налаштовує викладач, але доступ здобувачеві надається працівником Центру незалежного оцінювання під час модульного тижня.

Загальна кількість студентів за діапазонами оцінювання



Показати дані графіку

Рис. 8. Результати модульного контролю за діапазонами оцінювання

Тема «Самостійна робота» містить модуль діяльності «Завдання», який дає змогу завантажити роботу здобувачем на перевірку з наступним оцінюванням викладачем.

Під час вивчення освітньої компоненти «Транспортні засоби» здобувачі мають право на визнання (перезарахування) результатів навчання, набутих у неформальній та інформальній освіті. Вони можуть самостійно вибирати і опанувати (поглиблювати) знання в розрізі освітньої компоненти або окремих її тем, використовуючи різні освітні платформи, професійні курси (рис. 9). Підставою для зарахування результатів є отримання відповідного документа.

Дотримання академічної доброчесності здобувачами реалізується шляхом особистого самостійного виконання лабораторних робіт, модульних і підсумкових контролів, виконання самостійної роботи, дотримання авторського права, достовірності виконаних досліджень.

Для здобувачів Moodle полегшує доступ до інформації, яка знаходиться в одному місці (реалізується у вигляді посилань на ресурси), і створює краще навчальне середовище, забезпечує тісну взаємодію «викладач-здобувач» (наприклад використання модуля діяльності «Форум» для забезпечення зворотного зв'язку).

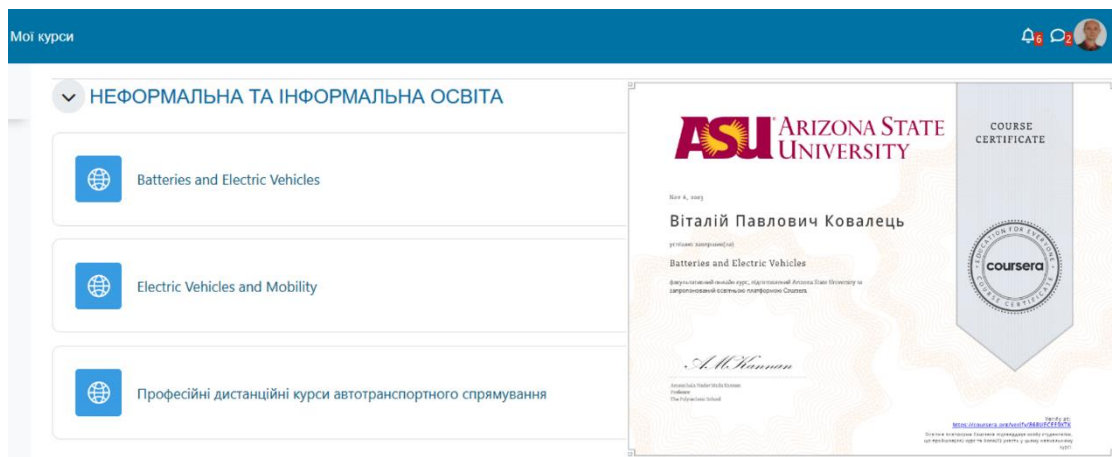


Рис. 9. Неформальна та інформальна освіта

Висновки. Отже, загальний вибір Moodle або іншої системи управління навчанням залежить від конкретних потреб і можливостей користувача або організації. Використання саме платформи Moodle сприятиме покращенню якості навчання за допомогою вбудованих інструментів і

методів, забезпечивши здобувачам освіти доступ до різних ресурсів, сприяючи їхньому більш активному навчанням та підвищенню інтересу до опанування освітньої компоненти, зокрема «Транспортні засоби», і зробивши їх рівними для різних форм навчання.

Список використаних джерел

1. Empowering educators for a better world. That's the mission of Moodle! *E-learning* : веб-сайт. URL: <https://www.e-learning.asia/service/moodle/>.
2. Sonya Trivedi. Moodle LMS 4.3 – A leap forward in user experience and efficiency. *Moodle*: веб-сайт. URL: <https://moodle.com/news/moodle-lms-4-3-a-leap-forward-in-user-experience-and-efficiency/>.
3. Al-Shboul M. Potential Use of Course Management Systems in Higher Education Institutions in Jordan. *US-China Education Review*. 2011. Vol. 8, No. 2. 220-232. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED519558.pdf>.
4. Nelson J. T. Integration of course management system communication tools in instruction. PhD diss. University of Tennessee. 2003. URL: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/516.
5. Рижков О. С., Рижков Р. С. Онлайн платформа Westudy для управління спільними програмами навчання з іноземними партнерами. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2018. Т. 63, № 1. С. 201-217. URL: <https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/1819>.
6. Навчальна платформа НУВГП. URL: <https://exam.nuwm.edu.ua/>.
7. Положення про навчально-методичне забезпечення освітньої компоненти на навчальній платформі Moodle. Рівне: НУВГП, 2022. URL: https://nuwm.edu.ua/index.php?preview=1&option=com_dropfiles&format=&task=frontfile.download&catid=1175&id=1108&Itemid=1000000000000.
8. Освітньо-професійна програма «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти галузі знань 27 «Транспорт» за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)» спеціалізації 275.03 «Транспортні

технології (на автомобільному транспорті)». Рівне: НУВГП, 2022. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/24099/1/%D0%9E%D0%9F%D0%9F-275-%D0%B1%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%80-2022.pdf>.

9. Хітров І. О. Силабус (02-02-70S) навчальної дисципліни «Транспортні засоби» для здобувачів вищої освіти ступеня «бакалавр», які навчаються за освітньо-професійною програмою першого рівня вищої освіти за спеціалізацією 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)» галузі знань 27 «Транспорт». Рівне: НУВГП, 2022. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/24243/1/02-02-70S.pdf>.

Хітров Ігор Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Тел.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Khitrov Ihor, PhD (Tech), Associate Professor, department of the Transport Technology and Technical Service, National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Tel.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 22.01.2024 р.

УДК 656.338

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ НА ВИБІР СКЛАДСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ ВАНТАЖНОГО ТЕРМІНАЛУ ПОРТУ

Старші викладачі В. Л. Ромах, В. І. Тихонін, І. І. Тихоніна

INFLUENCE OF THE GRAIN CARGOES CHARACTERISTICS ON THE CHOICE OF WAREHOUSE EQUIPMENT OF THE PORT'S CARGO TERMINAL

Senior lecturer V. L. Romakh, senior lecturer V. I. Tykhonin, senior lecturer I. I. Tykhonina

***Анотація.** У статті розглянуто сучасні особливості транспортування і складування зернових вантажів в умовах воєнної агресії та зміни транспортних ланцюгів постачання. Блокада чорноморських портів зумовила аграріїв шукати нові шляхи експорту зернових. На жаль, ні західні кордони, ні Дунайські порти не виявилися готовими до такого величезного вантажопотоку. Руїнування транспортної та складської інфраструктури потребує величезних ризикових інвестицій від аграріїв, що спонукає їх шукати нові інноваційні шляхи транспортування, складування та перевалки зернових вантажів.*

***Ключові слова:** зернові вантажі, складування, зерновий термінал, максі беги, драйлайнери, порт.*

***Abstract.** The modern features of transportation and storage of grain cargoes in conditions of military aggression and changes in transport supply chains is considered in the article.*

Agriculture is one of the most important sectors of the domestic economy, which provides food not only for our country, but is an important element of global food security. Ukraine is one of the five world leaders in grain exports. Before the war, the total capacity of the country's grain storage facilities was approximately 58 million tons, and during the first six months of the war 15.7 % Ukrainian grain storage facility was destroyed, damaged, or came under the control of the occupiers.

The blockade of the Black Sea ports forced farmers to look for new ways to export grain. Unfortunately, neither the western borders nor the Danube ports were unprepared for such a huge cargo flow. The destruction of transport and storage infrastructure requires huge risky investments from farmers, which prompts them to look for new innovative ways of transportation, storage and transshipment of grain cargoes.

The emergence of a significant cargo flow of grain cargoes in the Danube region contributed to the transformation of the region from depressed (as it was recently) to attractive for investment.

Making huge investments in the construction of new grain terminals turned out to be quite risky, from the point of view of ensuring security and competitive advantages. In this regard, the work considers innovative technologies of transportation, storage and transshipment of grain cargoes using flexible containers, which allow to deliver grain cargoes «door to door» without additional technological operations. A flexible container protects grain cargo from adverse weather conditions, preserves the quality of the cargo, greatly simplifies the transshipment process and is a universal means of transportation by any type of transport.

Keywords: grain cargo, storage, grain terminal, maxi bags, dry liners, port.

Вступ. Сільське господарство є одним із найважливіших секторів вітчизняної економіки, що забезпечує продовольством не лише нашу країну, а також важливим елементом світової продовольчої безпеки. Україна входить до п'ятірки світових лідерів із експорту зернових.

У глобальному світі постійно збільшується споживання продуктів харчування, що спричинено динамічним зростанням населення планети, яке до 2050 року може досягти 9,6 млрд осіб порівняно з 7,7 млрд станом на 2019 рік (за демографічним прогнозом ООН) [1].

Таке стрімке зростання може призвести до значного збільшення попиту на продукцію зернового ринку, який є основним сектором харчової промисловості сучасності. Слід зазначити, що сподіватися на збільшення придатних для вирощування сільськогосподарських культур земель нема можливості, вони вже сьогодні повністю засіяні, як і на зростання врожайності, що також вже досить висока і може бути підвищена лише незначно. У зв'язку з цим постає питання щодо ефективного зберігання і транспортування зернових

вантажів із мінімальними нормами їхньої втрати та псування.

Вітчизняна сільськогосподарська галузь значно постраждала внаслідок вторгнення країни агресора на нашу територію. Значні втрати врожаю, техніки та обладнання через бойові дії, вивезення мільйонів тонн зерна з окупованих територій, мінування сільськогосподарських земель, руйнування налагоджених логістичних потоків – це лише частина цих наслідків. Блокада чорноморських портів і окупація портів Маріуполя і Бердянська значно знизили експортні можливості нашої країни та призвели до продовольчої кризи в найбільш бідніших країнах світу.

До повномасштабного вторгнення морем транспортувалося 62 % загальної доларової вартості товарів, залізницею – 12 %, автомобільним транспортом – 23 % [2]. Загальні втрати агропромислового комплексу країни станом на середину 2023 року склали: «більше 8,7 млрд дол. – зруйнованого майна, економічні втрати на суму більше 31 млрд дол. США, із яких більше половини економічних втрат через блокування морських портів» [3].

До війни загальні ємності зерносховищ країни склали приблизно 58 млн т, за перші пів року війни «приблизно кожне шосте (15,73 %) українське зерносховище (силос, елеватор, бункер і склад для зберігання зерна й насіння) було знищено, пошкоджено або потрапило під контроль окупантів» [4].

Втрата логістичних зав'язків, пошкодження зернових терміналів, блокада портів та інші несприятливі фактори зумовили аграрний бізнес шукати нові можливості та виклики. Так у країні з'явився новий логістичний маршрут для транспортування зернових вантажів через порти Дунаю, будуються нові зернові термінали з урахуванням питань загальної та енергетичної безпеки, використовуються найновітніші технології для транспортування і зберігання зернових вантажів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання зернової логістики, ефективності технологічних операцій збору, транспортування і зберігання зернових, ефективності зернових терміналів та оптимізації їхньої роботи розглядаються в багатьох роботах як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. Однак в умовах воєнної агресії та переорієнтації логістичних ланцюгів доставлення виникає питання необхідності інвестування в сучасні портові зернові термінали зі швидкими термінами окупності та необхідними засобами безпеки. Саме ці питання, на нашу думку, недостатньо розглянуто в наукових роботах [3-10].

У роботі [3], наприклад, дано повне попереднє техніко-економічне обґрунтування зернового терміналу з проведенням ринкового, технічного та фінансового аналізу з використанням декількох сценаріїв, забезпечення безпечної та ефективної роботи терміналу, враховуючи різні екологічні умови (від шумового забруднення до управління відходами). Однак наведений зерновий термінал не враховує специфіку роботи порту і

необхідне складське і навантажувально-розвантажувальне обладнання.

У дослідженні [4] проведено аналіз потужностей для зберігання зернових із прогнозом на наступний рік, визначено основні збитки і наслідки руйнування агросектора, розглянуто питання енергетичної безпеки елеваторів. У роботі запропоновано використовувати полімерні рукави для швидкого вирішення дефіциту потужностей, однак ця технологія не може бути використана в портах.

Автори дослідження [5] розглядають технологічні особливості транспортування зернових, приділяючи основну увагу розробленню ефективного збирально-транспортного комплексу. Вони визначають оптимальний склад збиральної техніки (її продуктивність) та інших необхідних транспортних засобів, враховуючи технічні особливості сільськогосподарських підприємств, і собівартість перевезення зернових культур. Також розглянуто проблематику доставлення зернових у ланцюгах поставок за участю автомобільного та морського транспорту. Запропоновано різні управлінські рішення з використанням сучасного математичного апарату і принципів нечіткої логіки. Незважаючи на глибину та обґрунтованість дослідження, на жаль, воно не враховує останні проблеми транспортування і зберігання вантажів в умовах невизначеності та обмеженості варіантів доставлення. Однак запропоновані авторами підходи щодо зниження транспортних витрат і непродуктивних простоїв можуть бути використані при наступних дослідженнях, а принципи нечіткої логіки знаходять своє адекватне використання в умовах зміни транспортних потоків і умов зберігання.

У роботі [6] автори розглядають процес транспортування зернових в умовах невизначеності та стохастичного характеру попиту. Робота є актуальною для визначення оптимальної взаємодії в транспортному ланцюзі з урахуванням потужностей

термінала, однак автори не розглядають питання оптимізації складського обладнання.

Автори роботи [7] пропонують стохастичну модель роботи портового термінала з урахуванням критерію нерегулярності доставлення, оцінку пропускної спроможності термінала, а також методику розрахунку необхідної ємності сховища. Також у роботі наведено розрахункові формули для оцінювання терміну окупності проекту будівництва термінала. На жаль, автори не розглядають наведені методики на прикладі зернових вантажів, і не враховують їхню специфіку.

У роботах [8, 9] автори пропонують вирішення завдання з удосконалення взаємодії різних видів транспорту на зерновому терміналі морського порту і розглядають саме технологічний аспект. У роботі [8] автори визначають, що процес оптимізації взаємодії різних видів транспорту в порту потребує побудови імітаційної моделі, яку вони і пропонують у роботі [9]. Для визначення вірогідності взаємного очікування автори пропонують побудову графів станів і переходів марковського процесу, які дають змогу визначити вірогідності простою в кожній ланці. Як основний інструмент імітаційного моделювання запропоновано використовувати ANYLOGIC 8.5.1 PLE, що дає змогу отримувати детальне уявлення про бізнес-процеси та оптимізувати їх. Основною проблемою використання запропонованого авторами алгоритму є його складність і необхідність відповідної підготовки в користувачів.

Автор у роботі [10] розглядає особливості зберігання та відвантаження зерна на зернових терміналах у морських портах. Він наголошує, що «...перевалочні термінали в портах мало чим відрізняються від лінійних заготівельних елеваторів. Крім приймання, зберігання і відвантаження, на багатьох терміналах також є лінії очищення та сушіння зерна» [10]. Основною відмінністю цих терміналів автор вважає

потужності, які в морських портах значно вищі за лінійні термінали.

З аналізу наведених досліджень можна зробити висновок, що питання зернових терміналів у портах є актуальним і потребує подальших досліджень щодо обґрунтування доцільності будівництва нових терміналів, визначення їхніх потужностей, оптимізації взаємодії різних видів транспорту на них і прискорення термінів їхньої окупності, враховуючи сучасні умови блокади портів, окупації територій і енергетичної безпеки.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є аналіз впливу характеристик зернових вантажів на вибір умов їхнього транспортування, складування, зберігання та перевалки на вантажних терміналах порту, що зумовлює вибір оптимального варіанта транспортування в умовах зміни логістичних ланцюгів поставок і ризикованості інвестицій у відновлення та розбудову логістичної інфраструктури.

Для досягнення мети в роботі поставлено такі завдання:

- проаналізувати зміни структури зернового ринку в країні в умовах воєнної агресії, окупації територій і блокади чорноморських портів;
- розглянути потужності Дунайського регіону для експорту зернових із урахуванням транспортної, складської та логістичної інфраструктури;
- визначити доцільність використання інноваційних гнучких контейнерів для транспортування, зберігання та перевалки зернових вантажів.

Основна частина дослідження. В умовах блокади чорноморських портів вітчизняний аграрний бізнес стикнувся з проблемою побудови нових логістичних маршрутів і їхньої оптимізації. Швидка переорієнтація на автомобільні перевезення до портів Польщі та Німеччини сприяла значному підвищенню вартості доставлення та була обмежена пропускними спроможностями пунктів пропуску на кордоні.

Альтернативний варіант транспортування залізницею виявився також досить витратним, крім того, постала проблема невідповідності колій вітчизняної залізниці європейським і відсутності достатньої кількості спеціалізованих вагонів. Переорієнтація на Дунайські порти спочатку призвела до «колапсу» на дорогах і біля портів у зв'язку з тим, що пропускні спроможності портів виявилися недостатніми для наявного вантажопотоку, однак ця проблема знайшла своє вирішення досить швидко.

Слід зазначити, що структура зернового ринку в Україні останнім часом зазнала значних змін. Ринок зернових в умовах зростання та загострення конкуренції було переорієнтовано з внутрішнього споживання на експорт. Україна експортує 16 основних зернових і зернобобових культур, що поділяють на чотири категорії, «велику трійку» складають кукурудза, пшениця та ячмінь [1]. Динаміку

експорту зернових із України за маркетинговими роками наведено на рис. 1.

Аналіз експорту зернових за різними видами транспорту (залізничний, автомобільний, морський) у 2022-2023 фінансових роках свідчить, що 52 % було експортовано через глибоководні порти, 21 % – дунайські морські порти, а решта 27 % – автомобільним і залізничним транспортом до Європи через західні кордони країни [17].

Поява значного вантажопотоку зернових вантажів у Дунайському регіоні сприяла перетворенню регіону з депресивного (яким він був останнім часом) на інвестиційно привабливий, до регіону зайшли не лише вітчизняні інвестори, але і іноземні, міжнародні представництва Світового банку та Європейського банку реконструкції та розвитку. Було значно збільшено пропускні потужності портів для автомобільного і залізничного транспорту, відкриваються нові приватні термінали та логістичні центри.

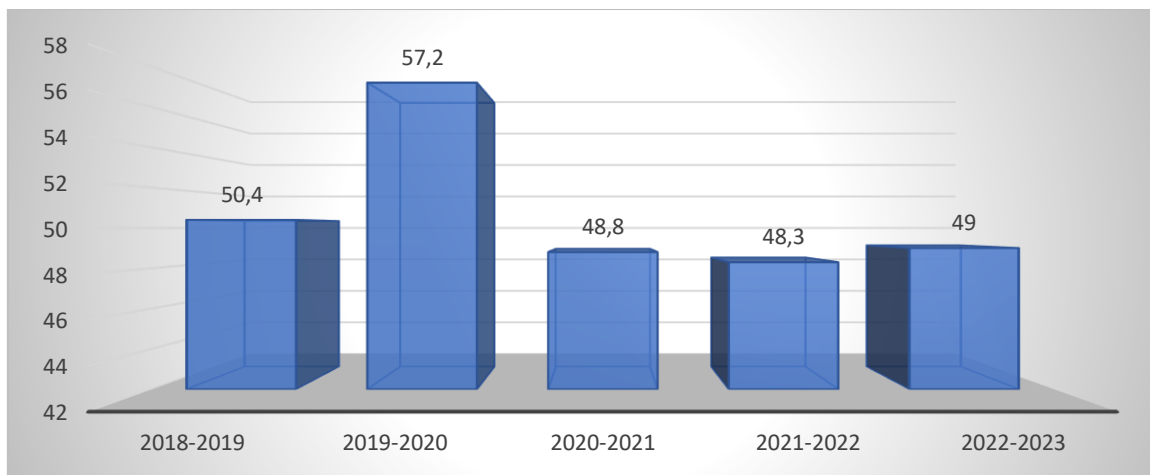


Рис. 1. Динаміка експорту зернових з України за маркетинговими роками, млн т

Джерело: розроблено автором на підставі робіт [11-16]

Найближчим часом на Дунаї планується збудувати 12 нових терміналів [18]. Через недостатні потужності для зберігання та експорту зерна такі відомі

агрохолдинги, як «Нібулон», «Кернел», Danube Logistics Group, вкладають інвестиції в будівництво зернових терміналів у регіоні.

Серед основних переваг регіону для експорту зернових можна виділити такі:

- це ключовий маршрут для транспортування зернових до Румунії, Болгарії, Сербії, Угорщини та ін.;

- наявність розвиненої інфраструктури (елеватори, портові споруди, внутрішні водні шляхи з виходом до Чорного моря, залізниця, автомобільні шляхи);

- торговельні угоди з країнами Дунайського регіону, що значно спрощує експорт зерна до інших країн і регіонів;

- високі стандарти якості, яких дотримуються вітчизняні експортери зерна, з перевіркою якості та відповідною сертифікацією;

- забезпечення транспортування і зберігання зернових вантажів у регіоні з урахуванням сучасних викликів щодо енергетичної безпеки та захисту елеваторів.

Незважаючи на те, що регіон постійно стикається з усе новими та новими викликами, подолання їх відбувається досить швидко. Так, наприклад, коли у 2022 році автодорожня інфраструктура регіону виявилася неготовою до великої кількості вантажівок, що везли зернові до регіону, відсутністю розподільчих центрів, що призводило до величезних черг і заторів на дорогах, менш ніж за пів року проблему було вирішено за рахунок впровадження системи електронної черги і створення накопичувачів. Крім того, впровадження сучасних інформаційних систем управління сприяло значному розширенню кола додаткових послуг, серед яких можна виділити такі:

- обмін даними з портовими операторами, вантажоодержувачами та іншими учасниками транспортного процесу в режимі реального часу;

- управління технічними засобами регулювання дорожнього руху (світлофори, шлагбауми, електронні табло тощо, щоб інформувати водіїв про необхідність виїзду до порту або терміналу);

- система автоматичного розрахунку вартості послуг і відповідних звітів для вантажовласників;

- електронна система кодування автомобілів через систему штрихкодів або QR-кодів, що полегшує їхню ідентифікацію в порту і на терміналах;

- використання хмарних сервісів і безпаперової системи передавання інформації всім учасникам транспортного процесу;

- додаткові послуги з лабораторних аналізів, сюрвею, митного оформлення, сертифікації тощо.

Багато проблем виникає сьогодні на портових терміналах через відсутність достатньої кількості перевантажувальної техніки та відповідних технологій перевантаження зерна на великих зернових терміналах. Враховуючи, що перевантажувальна техніка є доволі дорогою, порти намагаються використовувати найбільш універсальну техніку, яку легко можна переорієнтувати на інший вантажопотік.

Слід зазначити, що будівництво портових зернових терміналів є досить інвестиційно затратним проектом зі значними термінами окупності, крім того, в умовах війни елеватори є досить вразливими щодо безпеки. Аграрії та перевізники все більше схиляються до використання універсальних засобів транспортування, які придатні для використання будь-яким транспортом і на будь-якому терміналі.

Останнім часом великі аграрні компанії світу все частіше транспортують зернові вантажі не насипом, а в спеціалізованих контейнерах – це не лише зберігає вантажі від псування і втрат, але і дає змогу використовувати вже наявні потужності в портах і на залізничних станціях. Для цього можуть використовуватися такі інноваційні способи перевезення, як «Maхі bag» і драйлайнери.

Враховуючи особливості зернових вантажів, необхідність збереження їхньої якості під час транспортування, використання спеціальних інноваційних гнучких контейнерів значно спрощує процес їхньої перевалки. Немає необхідності обладнання терміналу

конвеєрними стрічками, транспортерами та іншим дорогим обладнанням. Крім того, гнучкий контейнер захищає зернові вантажі від несприятливих погодних умов.

Наприклад, сумка «Махі Ваг» має об'єм до 18 м³, а вантажопідйомність 14 т (рис. 2).



Рис. 2. Приклад використання «Махі Ваг» [19]

«Махі Ваг» – це інноваційний гнучкий контейнер для зернових вантажів українського виробника «АРІВАПАК», запатентований в Україні, Європі та США. Багаторазовий цикл повністю герметичний і може успішно використовуватися понад 100 разів [19]. Він дає змогу збільшити корисний об'єм напіввагона і перевезти до 70 т пшениці, замість 56 т. Основні переваги використання «Махі Ваг»:

- міцність і герметичні властивості, ідеальний для зберігання і транспортування будь-яких сипких харчових продуктів, включаючи пшеницю, овес, ячмінь, кукурудзу тощо;

- можливість використання різних видів транспорту від авто- і залізничного до морського;

- відсутність втрати вантажу під час транспортування через розсипання, вивітрювання, намокання та ін.;

- збільшення швидкості перевантаження вантажу за рахунок компактного укладання контейнера в п'ять шарів, що дає змогу перевантажити до 100 т за 10 хв;

- можливість збільшити корисний об'єм напівпричепи – висота «Махі Ваг» 3,1 м, і використовувати додаткові 15 м³ при завантаженні в напівпричіп [19].

Ще одним інноваційним способом транспортування та складування зернових вантажів є використання драйлайнерів (BIG Red Dry Liner) [20], які отримали широку популярність у США, Китаї, Кореї, Австралії, Аргентині, Нідерландах та інших країнах.

Драйлайнери – це вкладиші в контейнер, призначені для перевезення насипної продукції різної консистенції та форми (від пластівців і гранул до порошків), вони виготовляються зі тканого поліетилену високої щільності (HDPE) і поліпропілену

(PP) з двобічною або однібічною ламінацією, повністю відповідають

міжнародним стандартам ISO 9001:2000 і вимогам високої якості [20] (рис. 3).



Рис. 3. Приклад використання драйлайнера [20]

Драйлайнери широко застосовуються як для перевезення різноманітних вантажів у стандартному залізничному або морському контейнері. Рефрижераторні контейнери теж можуть бути укомплектовані такими вкладишами з метою сепарації стінок і вантажу від забруднень [20].

Використання інноваційних контейнерів для транспортування зернових вантажів позбавляє вантажовідправників від необхідності пошуку спеціалізованих транспортних засобів (вантажівки-хопери, напівпричепи) і спеціалізованих морських суден, а також відповідного дорогого перевантажувального та складського обладнання. Вантаж «доставляється до порога споживача» без необхідності перевантаження. Контейнерні вкладиші доступні в різних конфігураціях залежно від характеру вантажу і типу обладнання в пункті завантаження та розвантаження і можуть використовуватися для 20- або 40-футових контейнерів [20].

Висновки. Зростання населення нашої планети викликає необхідність збільшення кількості продовольства, основну частину

якого складають зернові вантажі. Україна входить до складу країн лідерів із експорту зернових і забезпечує ними найбільш бідні країни світу.

Воєнна агресія та окупація значної території країни, блокада чорноморських портів і пошкодження зернових терміналів зумовили аграрний бізнес шукати нові можливості та будувати нові логістичні маршрути для експорту зернових. Так, у країні з'явився новий логістичний маршрут для транспортування зернових вантажів через порти Дунаю, однак необхідно було досить швидко оптимізувати логістичну, портову та складську інфраструктуру регіону до нових вантажопотоків, що потребувало значних інвестицій.

Вкладати величезні інвестиції в будівництво нових зернових терміналів виявилось досить ризикованим, з точки зору забезпечення безпеки та конкурентних переваг. У зв'язку з цим у роботі розглянуто інноваційні технології транспортування, зберігання та перевалки зернових вантажів із використанням гнучких контейнерів, що дають змогу доставляти зернові вантажі «від дверей до

дверей» без додаткових технологічних операцій. Гнучкий контейнер захищає зернові вантажі від несприятливих погодних умов, зберігає якість вантажу,

значно спрощує процес перевалки та є універсальним засобом транспортування будь-яким видом транспорту.

Список використаних джерел

1. Shifting Demographics. United Nations. URL: <https://www.un.org/en/un75/shifting-demographics>.
2. Mazaraki A., Melnyk T. Svitove gospodarstvo: vyklyky rosijs'ko-ukrai'ns'koi' vijny. *Scientia Fructuosa*. 2022. No 3. S. 4-35. URL: [https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2022\(143\)01](https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2022(143)01).
3. Зерновий термінал на кордоні України та Польщі – попереднє техніко-економічне обґрунтування. *Centre for Food and Land Use Research at Kyiv School of Economics*. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/07/KSE-Grain-Terminal-Presentation-UKR.pdf>.
4. Аналітична довідка про зерновий ринок та стан потужностей для зберігання зерна в Україні (станом на 30 листопада 2022 р.). URL: <https://kmzindustries.ua/news/analitichna-dovidka-pro-zernovij-rinok-ta-stan-potuzhnostej-dlja-zberigannja-zerna-v-ukraini-stanom-na-30-listopada-2022-r>.
5. Проблеми транспортно-логістичного забезпечення в аграрній галузі: монографія / Н. Г. Бережна, О. С. Біляєва, В. А. Войтов та ін. Харків: Міськдрук, 2019. 180 с.
6. Natalya Shramenko, Dmitriy Muzylyov, Mykola Karnaukh. The Principles of the Choice of Management Decisions Based on Fuzzy Logic for Cargo Delivery of Grain to the Seaport. *International Journal of Engineering & Technology*. 7 (4.3) (2018). P. 211-216.
7. Postan M., Kushnir L. A method of determination of port terminal capacity under irregular cargo delivery and pickup. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, No. 3(82). (2016). P. 30–37. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/76285>.
8. Кічка О. І., Кічка О. В. Формалізація процесів взаємодії залізничного та морського транспорту у морському зерновому терміналі. *Транспортні технології та безпека дорожнього руху. Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 21-23.
9. Кічка О. В., Кічка О. І. Імітаційна модель зернового терміналу морського порту. *Транспортні технології та безпека дорожнього руху. Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 23-25.
10. Черній В. О. Особливості зберігання та відвантаження зерна на зернових терміналах. *Зб. тез доп. 77-ї наук. конф. викл. акад., Одеса, 18-21 квіт. 2017 р.* Одеса, 2017. С. 38-40.
11. Обзор рынка зерновых культур 2021: экспорт, производство, тенденции. URL: <https://latifundist.com/analytics/23-obzor-rynka-zernovyh-kultur-2021-eksport-proizvodstvo-tendentsii>.
12. Офіційно: у 2018/2019 МР Україна експортувала рекордний обсяг зернових – 50,4 млн тонн. URL: <https://minagro.gov.ua/news/oficijno-u-20182019-mr-ukrayina-eksportovala-rekordnu-kilkist-zerna-504-mln-tonn>.
13. Офіційно: у 2019/2020 МР Україна оновила рекорд з експорту зернових – 57,2 млн тонн. Міністерство економіки України. URL: <https://www.me.gov.ua/News/Detail?lang=uk-UA&id=59a193ee-ce0e-4edb-93cf-765ce050cd25&title=Ofitsiino-U2019-2020-MrUkrainaOnovilaRekordZEksportuZernovikh57-2-MlnT>.
14. В Україні завершився зерновий маркетинговий рік 2020/2021: обсяг експорту. URL: <https://superagronom.com/news/13470-v-ukrayini-zavershivsya-zernoviy-marketingoviy-rik-2020-2021-obsyag-eksportu>.

15. Рожко В. Ранні зернові: результати сезону-2021/22 та старт 2022/23 МР в умовах війни. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1528022>.
 16. Експорт українського зерна у 2022/23 МР перевищив 42 млн тонн. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/news/1533758>.
 17. Офіційний сайт Міністерства Інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/timeline/Vodniy-transport.html>.
 18. На Дунаї збудують 12 терміналів для збільшення потужності портів. URL: <https://www.railinsider.com.ua/na-dunayi-zbuduyut-12-terminaliv-dlya-zbilshennya-potuzhnosti-portiv/>.
 19. Експорт зерна з України – знайдено інноваційний спосіб. URL: <https://interfax.com.ua/news/press-release/937461.html>.
 20. Inbound Logistics. URL: <https://flexitanks.wordpress.com/tag/dry-liner-logistics>.
-

Ромах Валентина Леонідівна, старший викладач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет. ORCID: 0000-0003-3958-0041.

Тихонін Володимир Іванович, старший викладач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет. ORCID: 0000-0003-1619-8130.

Тихоніна Ірина Ігорівна, старший викладач кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет. ORCID: 0000-0002-1945-9845.

Romakh Valentina Leonidovna, senior lecturer, Department of Port Operation and Cargo Work Technology, Odesa National Maritime University. ORCID: 0000-0003-3958-0041.

Tikhonin Volodymyr Ivanovych, senior lecturer, Department of Port Operation and Cargo Work Technology, Odesa National Maritime University. ORCID: 0000-0003-1619-8130.

Tikhonina Iryna Ihorivna, senior lecturer, Department of Fleet Operation and Maritime Transportation Technology. ORCID: 0000-0002-1945-9845.

Статтю прийнято 01.03.2024 р.

УДК 621.314

ТОПОЛОГІЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА РАХУНОК ДВОСТУПЕНЕВОГО ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
асп. Д. А. Гордієнко

TOPOLOGY OF THE ENERGY HARVESTING SYSTEM FOR LARGE-SCALE SOLAR POWER PLANTS USING A TWO-STAGE DIFFERENTIAL POWER CONVERTER

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate D. A. Hordiienko

Анотація. Проведено аналіз архітектур збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій. Розглянуто переваги та недоліки використання підвищувального перетворювача в цих архітектурах. Наведено топологію двоступеневого диференціального перетворювача потужності з характеристиками мережі збору постійного струму, що забезпечує більший вихід енергії для великомасштабних сонячних електростанцій. Наведено

принцип роботи перетворювача і протікання струму у схемі під час перемикання. Проведено розрахунок роботи каскадів балансування струму та вирівнювання напруги, що обробляють часткову потужність і дають змогу групам фотоелектричних панелей працювати на максимальній потужності під впливом умов навколишнього середовища.

Ключові слова: балансування струму та напруги, диференціальний перетворювач потужності, сонячна електростанція, фотоелектрична панель.

Abstract. The capacity of photovoltaic installations continues to grow and reaches hundreds of megawatts. Large-scale PV systems are valued for their high efficiency when their architecture is renewable and reliable. In addition, energy conversion costs are low and the installation is able to mitigate the effects of partial shading. Plants with distributed power electronics converters have demonstrated higher energy output, better reliability, significantly reduced design costs, and greater flexibility in PV plant designs. The article analyzes energy harvesting architectures for large-scale solar power plants. Advantages and disadvantages of using a boost converter in these architectures are considered. The topology of a two-stage differential power converter with DC collection network characteristics is presented, which provides higher energy output for large-scale solar power plants. The principle of operation of the converter and the flow of current in the circuit during switching are presented. The approach is to divide the solar panels into several zones using a central grounding point with a DC collection network and connecting them using a fractional-rated current-voltage balancing converter topology to achieve maximum power point tracking, thus mitigating the effects of partial shading and temperature drop. The proposed topology is characterized by fractional power, higher efficiency, scalability and lower cost. The operation of current balancing and voltage equalization cascades, which process partial power and allow groups of photovoltaic panels to work at maximum power under the influence of environmental conditions, has been calculated. It is shown that the proposed system can be scaled for large-scale solar power plants, while creating homogeneous and heterogeneous photovoltaic installations using photovoltaic panels from different manufacturers.

Keywords: current and voltage balancing, differential power converter, solar power plant, photovoltaic panel.

Вступ. Потужність фотоелектричних установок продовжує зростати і досягає сотень мегават [1, 2]. Великомасштабні фотоелектричні установки (VLS-PV) цінують за високу ефективність, коли їхня архітектура є оновлюваною та надійною. Крім того, витрати на перетворення енергії є низькими, а установка VLS-PV здатна пом'якшити наслідки часткового затінення [3, 4].

Установки VLS-PV з розподіленими перетворювачами силової електроніки продемонстрували вищу видачу енергії, кращу надійність, суттєве зниження витрат на проектування та більшу гнучкість конструкцій фотоелектричних установок [5, 6].

Останні досягнення в силовій електроніці дали змогу розробити

центральні інвертори з більшою щільністю потужності [7, 8]. Центральний інвертор високої потужності АББ (PVS800) здатний досягти максимальної вихідної потужності 2 МВт від максимум 24 окремих входів постійного струму від кількох фотоелектричних ліній. Крім того, з появою вищої напруги кола 1500 В більша кількість фотоелектричних модулів може бути з'єднана послідовно, тим самим зменшуючи кількість об'єднувальних коробок, знижуючи струм і покращуючи загальну ефективність [9, 10].

Наразі відомо декілька типів архітектур збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій (рис. 1) [11, 12].

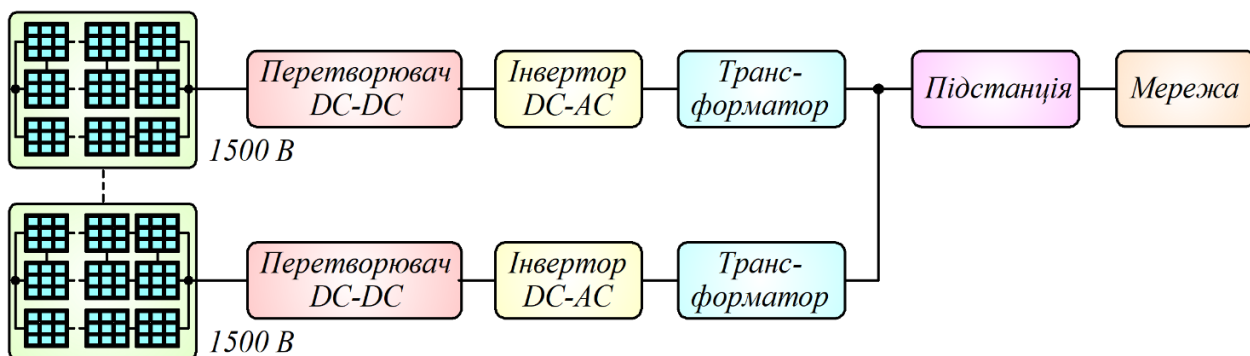


Рис. 1. Архітектура звичайної низьковольтної мережі збору електроенергії

Як показано на рис. 1, кілька фотоелектричних модулів з'єднані послідовно, паралельні групи під'єднані до перетворювача постійного струму та центрального інвертора. Як видно, цей підхід використовує повний номінальний перетворювач DC-DC, а потім інвертор DC-AC для збору різних ділянок великого сонячного поля. Основним недоліком цього підходу є те, що він потребує повноцінних перетворювачів постійного струму та інверторів постійного і змінного струму для

кожної секції фотоелектричних панелей. Відповідно капітальні витрати на установку є високими.

На відміну від цього, на рис. 2 наведено підхід до мережі збору постійного струму середньої напруги, у якому секції сонячної енергії подано та підключено до перетворювача постійного струму, що підвищує напругу фотоелектричної установки від 1500 В постійного струму до 3000 В постійного струму.

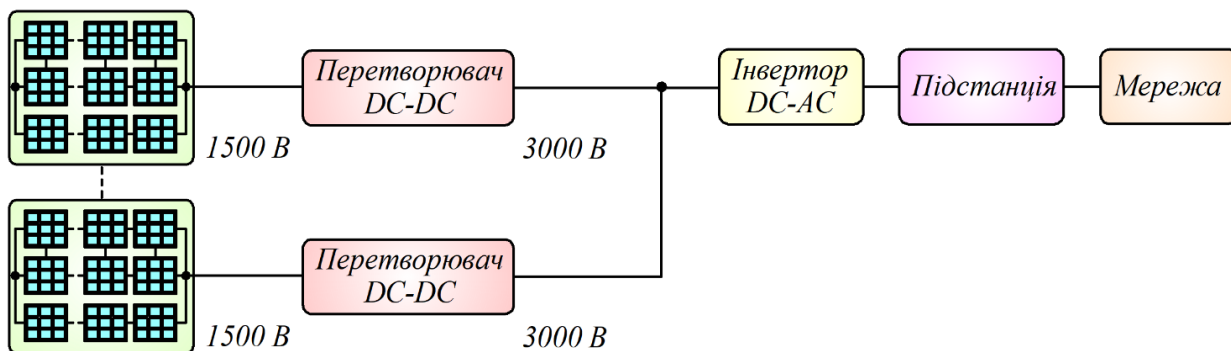


Рис. 2. Архітектура паралельного підключенням фотоелектричних груп із центральним інвертором високої потужності

Як показано на рис. 2, кілька груп фотоелектричних установок з'єднані паралельно, щоб сформувати мережу збору постійного струму середньої напруги. Така архітектура має кілька переваг покращеної ефективності та усунення окремих

інверторів DC-AC. Однак основний недолік використання підвищувального перетворювача DC-DC для кожної секції фотоелектричних панелей у вигляді капітальних витрат все ще існує.

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку і результатах, частково опублікованих у роботах [13, 14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Архітектура розподіленого відстеження точок максимальної потужності (DMPPT) є одним із найбільш перспективних рішень для подолання недоліків, пов'язаних із низькою енергоефективністю фотоелектричних панелей [15, 16]. У цій архітектурі є перетворювач DC-DC, призначений для відстеження точки максимальної потужності кожної фотоелектричної панелі. Щоб забезпечити максимальну гнучкість, перетворювачі повинні мати змогу підвищувати і знижувати напругу. Ще однією бажаною характеристикою перетворювачів, використовуваних в архітектурі DMPT, є висока ефективність, але одним із основних недоліків є висока вартість через велику кількість використовуваних перетворювачів [17, 18].

У наукових дослідженнях деякі автори досягли високої ефективності за допомогою перетворювачів, які контролюють лише частину вихідної потужності, таких як послідовно з'єднані перетворювачі, паралельні перетворювачі потужності та перетворювачі з прямим передаванням потужності [19, 20]. Однак такі топології перетворювачів є малоефективними для використання у фотоелектричних системах.

У роботах [21, 22] наведено методи, засновані на пристосуванні продуктивності панелі до точки максимальної потужності фотоелектричної системи. Хоча цей метод намагається відстежити точку максимальної потужності, але суттєвим недоліком є те, що він не відображує характеристики, на які впливають несприятливі і складні фактори, такі як затінення, пошкодження панелей і можливий вихід із ладу окремих елементів.

У роботах [23, 24] наведено загальні підходи, використовувані для зменшення навантаження, розподілення потужності пропорційно номіналу генератора та

продовження терміну служби батареї, але модульні підпанельні фотоелектричні перетворювачі не можуть регулювати напругу на шині постійного струму у відповідь на зміни навантаження.

Відомі також дослідження топологій, які можуть збільшити або зменшити потужність фотоелектричних панелей [25, 26]. Ці топології мають ефект підвищення ефективності, однак ефективність самої системи обмежена, оскільки інтенсивність сонячного світла, що потрапляє на панелі, змінюється залежно від сезону, часу і погодних умов.

Отже, використання фотоелектричних панелей із метою покращення умов експлуатації енергетичних систем, транспортних засобів і зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище, а також подальші дослідження високоєфективних і недорогих перетворювачів енергії є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження режиму балансування струму та вирівнювання напруги за рахунок топології двоступеневого диференціального перетворювача, що дасть змогу підвищити максимальну потужність системи збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій під впливом умов навколишнього середовища. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– розглянути архітектури збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій;

– навести топологію двоступеневого диференціального перетворювача потужності з балансуванням струму та вирівнюванням напруги;

– навести результати розрахунку двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великомасштабної фотоелектричної установки.

Основна частина дослідження.
Топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності. На рис. 3 наведено топологію двоступеневого

диференціального перетворювача потужності з характеристиками мережі збору постійного струму середньої напруги.

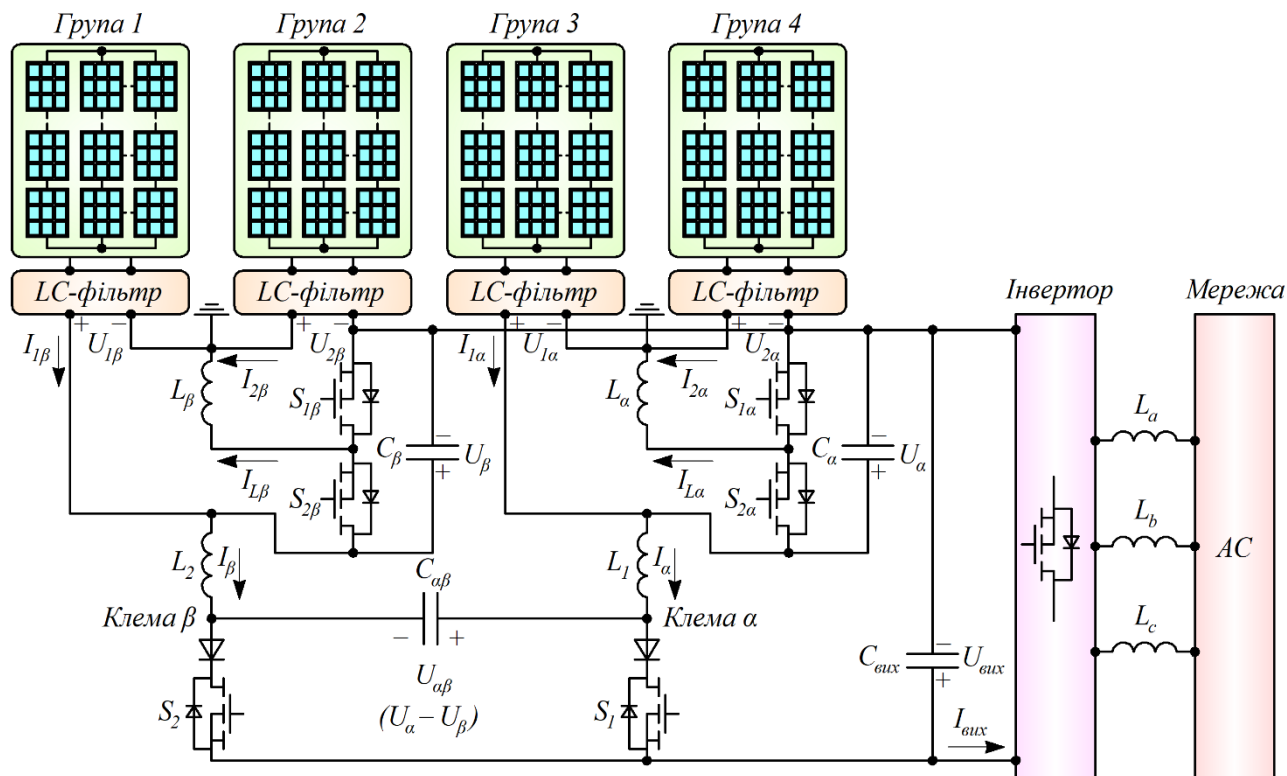


Рис. 3. Топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великих фотоелектричних установок

Як видно з рис. 3, два набори фотоелектричних установок (групи 1 і 2) з'єднані послідовно з заземленням у центрі. Вони внутрішньо під'єднані до перетворювача балансування струму з частковим номінальним значенням, який полегшує незалежне керування струмами фотоелектричної установки ($I_{1\beta}$, $I_{2\beta}$), у такий спосіб гарантуючи індивідуальне відстеження точки максимальної потужності (МРРТ) для груп 1 і 2 секцій фотоелектричної установки.

На етапі балансування струму використовують два перемикачі ($S_{1\beta}$, $S_{2\beta}$), які працюють у режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для керування струмом $I_{L\beta}$

котушки індуктивності L_β . Поточний підхід балансування обробляє лише частину загальної зібраної потужності та потребує перетворювачів потужності з частковою номінальною потужністю. Ступінь балансування струму обробляє диференціальну потужність від двох сонячних установок.

Групи 3 і 4 також мають аналогічний перетворювач симетрування струму. Негативні вихідні клеми груп 1 і 2 і груп 3 і 4 з'єднані разом, щоб утворити загальну точку. Дві позитивні вихідні клеми α і β під'єднані до перетворювача балансування напруги. Функція каскаду вирівнювання напруги полягає в обробці диференціальної

потужності двох паралельних наборів: груп 1, 2 і груп 3, 4 за допомогою відповідного ШІМ-керування перемикачами S_1 , S_2 . Конденсатор $C_{\alpha\beta}$ у стаціонарному стані утримує різницю напруги ($U_{\alpha}-U_{\beta}$).

Наведена концепція балансування струму і напруги гарантує, що кожна з груп фотоелектричних установок працюватиме в індивідуальному порядку, завдяки чому досягається загальний максимальний збір потужності в умовах часткового затінення та різниці температур.

До переваг запропонованого двоступеневого диференціального перетворювача потужності належить таке:

- каскади балансування струму і напруги обробляють часткову потужність для досягнення максимальної потужності в умовах часткового затінення;

- ступінь балансування струму використовує перемикачі з частково номінальною вищою напругою та нижчим струмом, тоді як ступінь балансування напруги використовує перемикачі з більшим струмом і нижчою напругою;

- високий ККД досягається за рахунок добової обробки потужності порівняно з іншими схемами;

- менша кількість блоків обробки перетворювача потужності;

- запропонований підхід можна масштабувати до кількох сонячних енергетичних систем номінальною потужністю декілька МВт, що складаються з багатьох груп фотоелектричних установок;

- підхід дає змогу створювати однорідні та гетерогенні фотоелектричні установки з використанням фотоелектричних панелей від різних виробників.

Робота каскадів балансування струму та вирівнювання напруги. Ступені балансування струму складаються з двох фотоелектричних електростанцій груп 1, 2 і груп 3, 4, з'єднаних послідовно з заземленням у центральній точці. Ступінь балансування струму для груп 1 і 2 складається з напівмостового інвертора з перемикачами ($S_{1\beta}$, $S_{2\beta}$), що працюють у

режимі ШІМ із робочим циклом. Коли перемикач $S_{1\beta}$ увімкнено,

$$U_{1\beta} = L_{\beta} \cdot \frac{di_{L\beta}}{dt}. \quad (1)$$

Індуктивність L_{β} можна виразити як

$$L_{\beta} = \frac{\delta_{\beta} \cdot U_{1\beta}}{f_{sw} \cdot \Delta I_{L\beta}}, \quad (2)$$

де δ_{β} – робочий цикл ШІМ;

$\Delta I_{L\beta}$ – поточна пульсація;

f_{sw} – частота перемикачів.

Середнім струмом індуктивності $I_{L\beta}$ можна керувати, регулюючи час увімкнення та вимкнення, тобто робочий цикл δ_{β} перемикачів $S_{1\beta}$ і $S_{2\beta}$

$$L_{L\beta} = I_{1\beta} - I_{2\beta}. \quad (3)$$

За допомогою керування вихідним струмом $I_{L\beta}$ груп 1 і 2 фотоелектричної установки можна регулювати їхні окремі робочі точки МРРТ. Крім того, загальну вихідну потужність груп 1 і 2 можна подати як

$$U_{\beta} \cdot I_{\beta} = U_{1\beta} \cdot I_{1\beta} + U_{2\beta} \cdot I_{2\beta}. \quad (4)$$

Такі самі рівняння можна записати для груп 3 і 4.

Ступінь вирівнювання напруги забезпечує напругу МРР, досягнуту на кожному підключеному фотоелектричному колі, контролюючи напругу $U_{\alpha\beta}$ на конденсаторі $C_{\alpha\beta}$. Ступінь вирівнювання напруги діє як кероване джерело напруги для фіксації напруги між двома клемми РВ (клеми α та β).

Ступінь балансування напруги витягує максимальну потужність, доступну в кожному колі, регулюючи коефіцієнт завантаження між S_1 і S_2 :

$$\delta_{S1} + \delta_{S2} = 1. \quad (5)$$

Коефіцієнт заповнення етапу балансування напруги можна розрахувати на підставі доступного струму, вилученого з кожного етапу балансування струму, заданого як

$$\delta_{S1} = \frac{I_{\beta}}{I_{\alpha} + I_{\beta}}. \quad (6)$$

Керування часом увімкнення та вимкнення на перемикачах S_1 і S_2 забезпечує реалізацію напруги МРР на кожній

під'єднаній фотоелектричній гілці за рахунок регулювання величини та полярності напруги. Напругу МРР можна досягти встановленням $U_{\alpha\beta}$, що дорівнює різниці напруг між максимальним колом напруг, доступним на U_{α} та U_{β} , і може бути виражена як

$$U_{\alpha\beta} = U_{\alpha\max} - U_{\beta\max}. \quad (7)$$

Загальне рівняння струму, що проходить через конденсатор $C_{\alpha\beta}$, має вигляд

$$i_{C_{\alpha\beta}} = C_{\alpha\beta} \cdot \frac{dU_{\alpha\beta}}{dt} = C_{\alpha\beta} \cdot \frac{\Delta U_{\alpha\beta}}{\delta_{S1} \cdot T} = I_{\alpha} - I_{\beta}. \quad (8)$$

Для розрахунку номіналу конденсатора, необхідного для каскаду балансування напруги, можна використати такий вираз:

$$C_{\alpha\beta} = I_{\alpha} \cdot \frac{\delta_{S1}}{f_{sw} \cdot \Delta U_{\alpha\beta}}, \quad (9)$$

де f_{sw} – частота перемикання перетворювача; $\Delta U_{\alpha\beta}$ – пульсація, необхідна для конденсатора.

Котушки індуктивності L_1 , L_2 визначають як

$$L_{1,2} = \left| -U_{вих} + U_{\beta} \right| \cdot \frac{(1 - \delta_{S1})}{f_{sw} \cdot \Delta I_{L\beta}}. \quad (10)$$

Так само для каскаду балансування струму каскад балансування напруги відокремив дві вхідні напруги від клем α та β . Кожен рядок працює незалежно від іншого.

Вихідну напругу $U_{вих}$ можна подати як

$$U_{вих} = \frac{P_{вих}}{I_{вих}} = \frac{P_{вх\alpha} + P_{вх\beta}}{I_{\alpha} + I_{\beta}}; \quad (11)$$

$$U_{вих} = \frac{(U_{1\alpha} \cdot I_{1\alpha} + U_{2\alpha} \cdot I_{2\alpha}) + (U_{1\beta} \cdot I_{1\beta} + U_{2\beta} \cdot I_{2\beta})}{I_{\alpha} + I_{\beta}}. \quad (12)$$

Наведена архітектура масштабується до кількох входів із ефективним локалізованим керуванням живлення для багаторядкових фотоелектричних установок, житлових і великомасштабних

фотоелектричних електростанцій. Масова потужність обробляється один раз із частковими втратами. Балансувальний конденсатор $C_{\alpha\beta}$ відіграє важливу роль у балансуванні напруг для досягнення МРР.

Такий підхід фактично усуває необхідність у перетворювачі DC-DC для відстеження МРРТ.

Розрахунок однорідної фотоелектричної установки. Однорідна фотоелектрична установка визначається як установка, що має однакову кількість послідовно / паралельно з'єднаних модулів на групу.

У табл. 1 наведено технічні характеристики однорідної фотоелектричної установки.

Відповідно до рис. 3 передбачено, що групи фотоелектричних установок 1, 2, 3, 4 знаходяться в різних робочих умовах через фактори навколишнього середовища. На рис. 4 наведено робочі характеристики кожної групи за різних температур і умов інсоляції.

Таблиця 1

Технічні характеристики однорідної фотоелектричної установки

Параметр	Значення
Фотоелектричний модуль	SPR-305-WHT
Конфігурація в чотирьох групах	24 послідовних / 40 паралельних модулів потужністю 293 кВт
Загальна потужність чотирьох груп P_{Σ} , МВт	1,1
Частота перемикання стану балансування f , кГц	20
Конденсатор $C_{\alpha\beta}$, мкФ	40
Індуктивності L_{α}, L_{β} , мГн	1,65
Індуктивності L_1, L_2 , мкГн	100

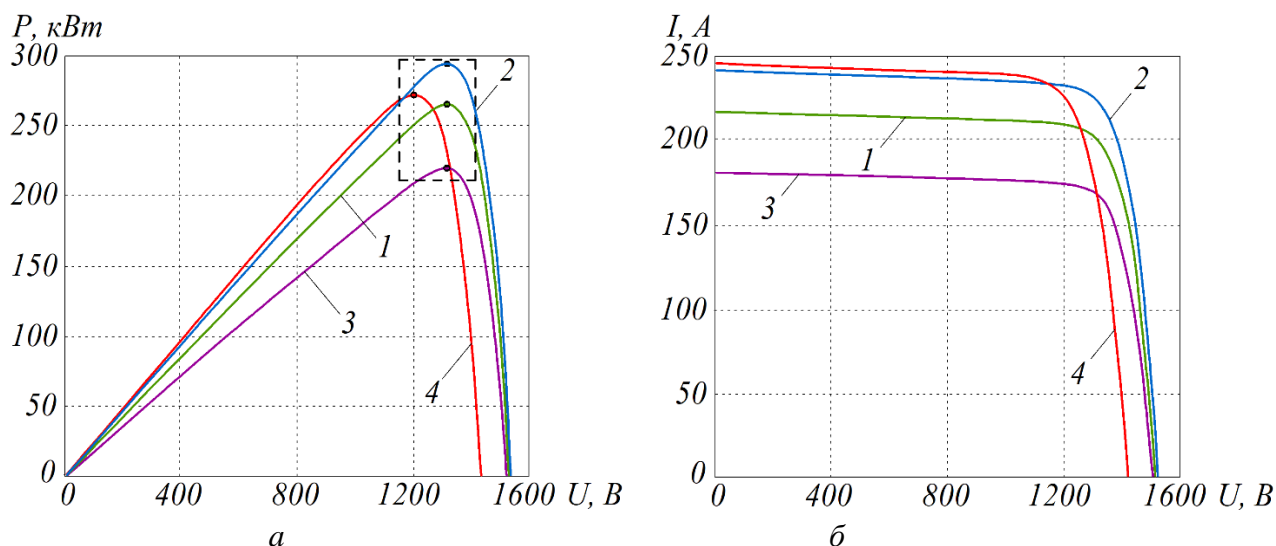


Рис. 4. Характеристики двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великих фотоелектричних установок:

- 1 – група 1 (25 °С, 0,9 кВт/м²); 2 – група 2 (25 °С, 1 кВт/м²);
3 – група 3 (25 °С, 0,75 кВт/м²); 4 – група 4 (50 °С, 1 кВт/м²)

З рис. 4 видно, що існує унікальна робоча умова, за якої значення напруги і струму для кожної групи відповідають максимальній потужності панелей.

Характеристики роботи каскадів балансування струму та вирівнювання напруги для розглянутої конструкції установки, при яких досягається

максимальна доступна потужність, наведено на рис. 5.

У табл. 2 наведено результати розрахунку двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великомасштабної фотоелектричної установки.

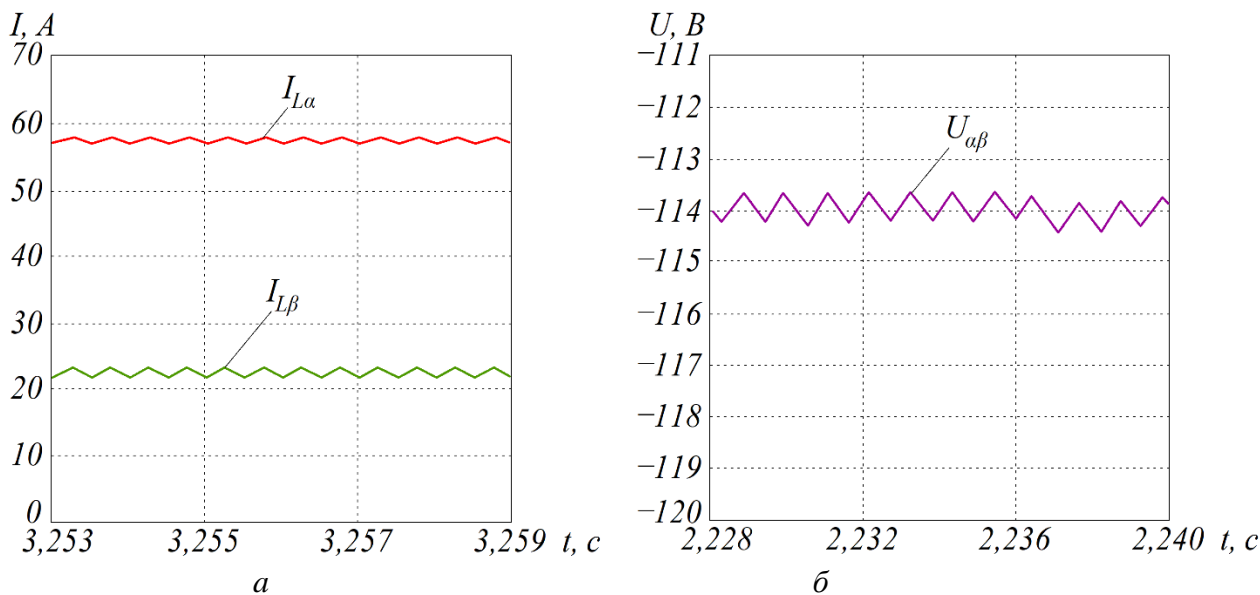


Рис. 5. Максимальні балансувальні струми індуктивностей L_α, L_β (а) і напруга конденсатора $C_{\alpha\beta}$ (б)

Таблиця 2

Результати розрахунку двоступеневого диференціального перетворювача

Група	Значення напруги	Балансування струму	Струм на клеммах	Напруга вирівнювання	Потужність наявної сонячної енергії	Втрати балансування	
	Значення струму	Балансування напруги				від струму	від напруги
1	$U_{1\beta} = 1323$ В	$I_{L\beta} = 22$ А	$I_\beta = 210$ А	$U_{\alpha\beta} = -144$ В	$P_\beta = 556$ кВт	29 кВт (5,24 %)	24 кВт (2,3 %)
2	$I_{1\beta} = 199$ А						
3	$U_{2\beta} = 1325$ В	$I_{L\alpha} = 57,3$ А	$I_\alpha = 193$ А		$P_\alpha = 486$ кВт	76 кВт (15,5 %)	
4	$I_{2\beta} = 221$ А						
	$U_{1\alpha} = 1319$ В						
	$I_{1\alpha} = 166$ А						
	$U_{2\alpha} = 1215$ В						
	$I_{2\alpha} = 223$ А						

Обидва балансувальні перетворювачі струму / напруги, за рис. 3, працюють зі своїми спеціальними робочими циклами перемикання, щоб отримати доступну максимальну потужність. Ступінь балансування струму для клем β і α обробляє струми $I_{L\beta} = 22$ А і $I_{L\alpha} = 57,3$ А, що становить частку загального струму. Крім того, наведена схема вирівнювання напруги працює за напруги $U_{\alpha\beta} = -144$ В, що є набагато меншим значенням. Отже, кількість вольт-ампер, оброблених каскадами балансування струму / напруги невелика для роботи за різних температур і умов інсоляції.

Отже, запропонована топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності здатна працювати з великомасштабною сонячною електростанцією при різних точках максимальної потужності.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– для відомих типів архітектур збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій необхідні повноцінні

перетворювачі постійного струму та інвертори постійного і змінного струму для кожної секції фотоелектричних панелей, що збільшує капітальні витрати на установку;

– наведена архітектура масштабується до кількох входів із ефективним локалізованим керуванням живлення для багаторядкових фотоелектричних установок, житлових і великомасштабних фотоелектричних електростанцій. Масова потужність обробляється один раз із частковими втратами. Балансувальний конденсатор відіграє важливу роль у балансуванні напруг для досягнення МРР. Такий підхід фактично усуває необхідність у перетворювачі DC-DC для відстеження МРР;

– запропонована топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності здатна працювати з великомасштабною сонячною електростанцією при різних точках максимальної потужності, оскільки існує унікальна робоча умова, за якої значення напруги і струму для кожної групи відповідають максимальній потужності панелей. При цьому обидва балансувальні перетворювачі струму і напруги працюють зі своїми спеціальними робочими циклами перемикання.

Список використаних джерел

1. Alblooshi A., Masoud M. I. Design of a 1 MW Grid-tied photovoltaic system. *2021 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICEET53442.2021.9659704.
2. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Study of the energy parameters of the system «solar panels – solar inverter – electric network». *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254. 012092. P. 1–12. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012092.
3. Rezaei J., Golshan M. H., Alhelou H. H. Impacts of integration of very large-scale photovoltaic power plants on rotor angle and frequency stability of power system. *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 16. P. 2384–2401. DOI: 10.1049/rpg2.12529.
4. Shair J., Li H., Hu J., Xie X. Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 145. P. 11111. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111111.
5. Khadka N., Bista A., Adhikari B., Shrestha A., Bista D. Smart solar photovoltaic panel cleaning system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 463. P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/463/1/012121.

6. Namjil E., Komoto K. Strategies for implementing of very large scale solar and wind power plants in the gobi desert for the Northeast Asia regional energy market. *2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC)*. 2022. P. 1179–1181. DOI: 10.1109/PVSC48317.2022.9938502.
7. Das P., Satpathy S., Bhattacharya S., Veliadis V. Design considerations of multi-phase multilevel inverters for high-power density traction drive applications. *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. 2022. P. 23–30. DOI: 10.1109/ITEC53557.2022.9813937.
8. Singh D., Sandeep N. Multiport multilevel inverter for high-frequency AC applications. *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES56012.2022.10080506.
9. Ebrahimi M., Khajehoddin S. A power decoupling technique for high power-density single-phase inverters. *2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2022. P. 813–818. DOI: 10.1109/APEC43599.2022.9773483.
10. Khomenko I. V., Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Shelest D. A. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012040. P. 1–15. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012040.
11. Blaabjerg F., Yang Y., Kim K., Rodriguez J. Power electronics technology for large-scale renewable energy generation. *Proceedings of the IEEE*. 2023. Vol. 111, No. 4. P. 335–355. DOI: 10.1109/JPROC.2023.3253165.
12. Zidane T. E., Aziz A. S., Zahraoui Y., Kotb H., Aboras K. M. Grid-connected solar PV power plants optimization: a review. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 79588–79608. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3299815.
13. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of operating modes and features of integration of renewable energy sources into the electric power system. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
14. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
15. Sheela A., Logeswaran T., Revathi S., Rajalakshmi K. Distributed MPPT configuration for improving solar energy production. *2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET)*. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9824131.
16. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
17. Zhang T., Jiang J., A review on differential power processing for PV submodule DMPPT. *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*. 2020. P. 1012–1017. DOI: 10.1109/SCEMS48876.2020.9352300.
18. Barcellona S., Barresi M., Piegari L., MMC-based PV three-phase system with distributed MPPT. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022. Vol. 37, No. 3. P. 1567–1578. DOI: 10.1109/TEC.2022.3167786.
19. Moghassemi A., Rahman S., Ozkan G., Edrington C., Zhang Z., Chamarthi P. Power converters coolant: past, present, future, and a path toward active thermal control in electrified ship

power systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 91620–91659. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3308523.

20. Cheng L., Wu W., Qiu L., Liu X., Ma J., Zhang J., Fang Y. An improved data-driven based model predictive control for zero-sequence circulating current suppression in paralleled converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 143. P. 108401. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108401.

21. Krstic N. N., Tasic D. S. Power and location of the maximum power points of photovoltaic array in the case of partial shading. *2023 58th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*. 2023. P. 171–174/ DOI: 10.1109/ICEST58410.2023.10187251.

22. Hburi L., Fahad H., Assad A., Powerful maximum power point tracking for PV systems: an artificial intelligence paradigm. *2022 Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT)*. 2022. P. 280–286. DOI: 10.1109/IICCIT55816.2022.10010688.

23. Muttaqin E. F., Maulana M. A., Fadlika I., Aripriharta A. Design and validation non-isolated boost converter for cascaded photovoltaic application. *2022 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICPERE56870.2022.10037506.

24. Zheng Y., Cheng Z., Liu C., Liu H., Amirabadi M., Lehman B. Modular wireless power transmission for photovoltaic subpanel system. *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2021. P. 546–553. DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595115.

25. Hegazy E., Saad W., Shokair M. Studying the effect of using a low power PV and DC-DC boost converter on the performance of the solar energy PV system. *2020 15th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICCES51560.2020.9334581.

26. Kareem M., Kurnaz S. Improving the efficiency of solar photovoltaic power generation using improved MPPT method. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/HORA49412.2020.9152882.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Статтю прийнято 21.03.2024 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

Випуск 207

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 22.03.2024 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 8,5. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.